

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

**ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE LA PEAU DU BÉTON PAR
ANALYSE SPECTRALE DES ONDES DE SURFACE**

Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées
Spécialité : génie civil

Ménouar HASSAIM

Sherbrooke (Québec), Canada

novembre 1999



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

**395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-67282-4

Canada

SOMMAIRE

Avant d'entreprendre des travaux coûteux de réfection, pour sauvegarder et réhabiliter des ouvrages, un diagnostic de leur état est nécessaire. Ce diagnostic est important pour les entretenir de façon économique et efficace. Il doit porter entre autre sur l'état du béton de surface et proche de la surface car c'est ce béton, qui en particulier, souffre le plus des conséquences de la fatigue thermique, du gel-dégel et de l'attaque des sulfates. Pour caractériser l'état du béton, les ingénieurs font appel à une méthode d'auscultation qui consiste à prélever des échantillons par carottage. Cette technique est fastidieuse, destructive et peu précise du fait qu'elle représente une qualité ponctuelle de la structure.

Face à ce problème, plusieurs techniques d'auscultation non destructives des ouvrages de génie civil ont été mises en œuvre ces dernières années. Le but de cette maîtrise est d'étudier l'aptitude de la technique d'Analyse Spectrale des Ondes de Surface (ASOS) pour caractériser l'état du béton de surface et définir son étendue en profondeur. Pour cela, des essais de laboratoire ont été menés sur trois blocs de béton de qualité différente et sur un bloc multicouche. À la suite de ces essais, une procédure d'essai a été établie et il est apparu que la technique est sensible à la qualité du béton et qu'elle est capable de détecter et de caractériser les variations de la qualité dans le béton. Enfin, il a été possible d'estimer l'épaisseur du béton endommagé.

Afin de vérifier les résultats obtenus au laboratoire et acquérir une expérience de terrain, des essais ont également été réalisés sur la face aval du barrage des Chutes Hemming (Québec). Les résultats de ces essais ont montré que la procédure développée en laboratoire est satisfaisante et que la technique est capable d'identifier les zones de béton réparées et de spécifier l'épaisseur du béton de surface. Enfin, la combinaison ASOS-tomographie a été introduite et validé sur le site.

*Je dédie ce travail à mes très chers parents,
ma famille et à tous mes amis.*

.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon directeur de recherche le Professeur Gérard Ballivy, qui m'a accueilli dans son laboratoire, pour son aide et l'autonomie qu'il m'a été accordé.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon codirecteur le Professeur Jamal Rhazi pour sa confiance, sa disponibilité et ses conseils précieux durant les longues heures d'essai et pour sa contribution inestimable à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements s'adressent à Messieurs les membres du jury qui ont bien voulu prendre de leur temps pour corriger et évaluer ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Hydro-Québec et le Conseil de Recherche en Science Naturelle et Génie (CRSNG) pour avoir financé et suivi ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Chtaïni pour toute l'aide qu'il a apporté dans la réalisation de ce travail. Je remercie également Monsieur Christian Clavet du Groupe d'Acoustique et vibrations de l'Université de Sherbrooke (GAUS) pour son aide, ses conseils et sa disponibilité. Je ne saurais oublier l'attention et surtout les conseils inestimables de Messieurs Al-Hunaidi du NRC (Ottawa) et de Mourad Karray.

Je désire aussi remercier Messieurs Georges Lalonde, Martin Lizotte et Danick Charbonneau, techniciens du laboratoire de mécanique des roches, pour leur aide dans la réalisation des essais de laboratoire et sur chantier.

Je remercie également tous mes collègues et le personnel de génie civil pour leur bonne humeur et pour m'avoir permis de passer un agréable séjour à l'Université de Sherbrooke.

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 1 Introduction	1
Chapitre 2 L'auscultation dans le domaine du génie civil	4
2.1. La nécessité de l'auscultation	4
2.2. Les principales techniques non destructives	5
2.2.1. Les méthodes acoustiques.	7
2.2.2. La technique radar et la thermographie infrarouge	9
2.3. Conclusion	11
Chapitre 3 La méthode d'analyse spectrale des ondes de surface (ASOS)	13
3.1. Propagation des ondes mécaniques	13
3.1.1. Les ondes de volume	13
3.1.2. Les ondes de Rayleigh	15
3.1.3. Caractère dispersif des ondes de Rayleigh	17
3.2. Description de la technique d'analyse spectrale des ondes de surface	19
3.2.1. Configuration de mesure et principe de l'ASOS	21
3.2.2. La source d'énergie	23
3.2.3. Les récepteurs	23
3.2.4. Acquisition et traitement des données	24
3.3. Synthèse des travaux de la littérature	28
3.3.1. Les applications de la technique sur les sols et les chaussées	28
3.3.1.1. Les critères de sélection des longueurs d'ondes	29
3.3.1.2. Profondeur de pénétration des ondes de Rayleigh	30
3.3.1.3. Influence des modes de propagation des ondes de Rayleigh	30
3.3.2. Les applications de la technique sur des structures en béton	31
3.3.2.1. Effets des réflexions sur les résultats	32
3.3.2.2. Étude des défauts présents dans le matériau	34
3.4. Conclusion	35

Chapitre 4 Programme expérimental	37
4.1. Introduction	37
4.2. Les modèles expérimentaux	37
4.2.1. Les blocs homogènes	38
4.2.2. Le bloc multicouche	40
4.2.3. Les discontinuités	41
4.3. Équipements et configurations de mesures	44
4.3.1. Procédure d'essai et configurations de mesures	44
4.3.2. Les sources d'émission	46
4.3.3. Les capteurs de détection	48
4.3.4. Le système d'acquisition	49
4.3.4.1. L'analyseur HP	49
4.3.4.2. La chaîne d'acquisition	49
4.4. Le traitement des données	52
4.5. Essais soniques	54
4.5.1. Le sonoscope	54
4.5.2. Procédure	56
Chapitre 5 Présentation et analyse des résultats	57
5.1. Application de l'analyse spectrale des ondes de surface sur le béton	57
5.1.1. Influence des réflexions sur les résultats	57
5.1.2. Élimination des réflexions	60
5.1.2.1. Fenêtre exponentielle	60
5.1.2.2. Fenêtre exponentielle modifiée	62
5.1.2.3. La fenêtre Kaiser	63
5.1.2.4. Fenêtre "multiplication du signal par lui-même"	67
5.1.3. Critère de sélection des longueurs d'ondes	67
5.1.4. Procédure de traitement de données pour l'analyse spectrale des ondes de surface	72
5.2. Résultats relatifs aux blocs homogènes	74
5.3. Résultats relatifs au bloc multicouche	77
5.4. Influence des paramètres d'essai	80
5.4.1. Distance entre récepteurs	80
5.4.2. Distance source-premier récepteur	84

5.4.3. Type de source	90
5.5. Résultats sur les discontinuités	95
5.5.1. Discontinuités verticales	95
5.5.2. Discontinuités horizontales	99
Chapitre 6 Application de l'ASOS sur une structure en service	102
6.1. Introduction	102
6.2. Description du barrage	102
6.2.1. Investigations antérieures	104
6.2.2. Localisation des essais	105
6.3. Programme d'essai	105
6.3.1. Auscultation du barrage	106
6.3.1.1. Application de l'analyse spectrale des ondes de surface	107
6.3.1.2. Application de la tomographie associée à l'analyse spectrale des ondes de surface	108
6.3.2. Travaux de laboratoire	112
6.3.2.1. Essai sonique	115
6.3.2.2. Essais mécaniques	116
6.4. Résultats des essais et interprétations	116
6.4.1. Résultats des essais d'ASOS	117
6.4.1.1. Résultats obtenus pour le chaînage 0+009 m	119
6.4.1.2. Résultats obtenus lors des essais de tomographie	122
6.4.1.3. Synthèse des résultats	125
6.4.2. Résultats des travaux de laboratoire	126
6.4.2.1. Évaluation visuelle	127
6.4.2.2. Essai sonique	128
6.4.2.3. Essais mécaniques	131
6.4.3. Interprétations de l'ensemble des résultats	132
6.5. Conclusion	133
Annexe 1	138
Annexe 2	141
Références bibliographiques	145

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Les principales techniques d'auscultation	5
Figure 2.2 Quelques techniques permettant l'estimation de la résistance à la compression	6
Figure 2.3 Principe de l'essai sonique	7
Figure 2.4 Principe de l'impact écho	8
Figure 2.5 Réflexions et transmissions du signal radar à l'interface entre deux matériaux	10
Figure 2.6 La thermographie infrarouge [Holf, F.B. et Eales, J.W., 1987]	11
Figure 3.1 Propagation d'une onde de compression (onde P)	14
Figure 3.2 Propagation d'une onde de cisaillement (onde S)	14
Figure 3.3 Séisme du Mexique du 19.09.1985 enregistré à Strasbourg (France)	15
Figure 3.4 Propagation d'une onde de Rayleigh	16
Figure 3.5 Déplacements dus aux ondes de Rayleigh en milieu élastique	16
Figure 3.6 Propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu multicouche	18
Figure 3.7 Propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu semi infini homogène	19
Figure 3.8 La méthode «steady state»	20
Figure 3.9 Configuration et équipement de mesure pour l'ASOS	21
Figure 3.10 Exemple de fonction de cohérence	25
Figure 3.11 Exemple de spectre de phase «non déroulé» et «déroulé»	26
Figure 3.12 Exemple de courbe de dispersion	27
Figure 3.13 Exemples de positions de la source, par rapport aux récepteurs, avec la configuration CRMP [Nazarian et col., 1983]	29
Figure 3.14 Effets de la fenêtre exponentielle sur les réflexions	33
Figure 4.1 Caractéristiques des blocs homogènes	38
Figure 4.2 Bloc multicouche	40
Figure 4.3 Les différentes discontinuités introduites dans le bloc	41
Figure 4.4 Disposition des discontinuités avant la mise en place du béton	42
Figure 4.5 Disposition des discontinuités verticales et horizontales	43
Figure 4.6 Configuration de mesure	45

Figure 4.7 Disposition des capteurs lors de l'étude des discontinuités (verticales et horizontales)	46
Figure 4.8 Les différentes sources utilisées	47
Figure 4.9 Accéléromètre PCB utilisé lors des essais	48
Figure 4.10 La chaîne d'acquisition	50
Figure 4.11 Visualisation de l'écran de lecture du logiciel «GAGEALI»	51
Figure 4.12 Menu du logiciel de traitement de donnée SASW	53
Figure 4.13 Le sonoscope	55
Figure 4.14 Essai sonique	56
Figure 5.1 Influence du train d'onde de fortes amplitudes et des réflexions sur le spectre de phase	59
Figure 5.2 Effet de l'application d'une fenêtre exponentielle ($f(t)=e^{-\nu t}$) sur deux signaux enregistrés à la surface d'un bloc de béton	61
Figure 5.3 Effet de la fenêtre <i>exponentielle</i> sur le second signal en fonction du temps d'arrivée du signal 2 par rapport au signal 1	62
Figure 5.4 Efficacité de la fenêtre <i>exponentielle modifiée</i> pour éliminer les réflexions	64
Figure 5.5 Caractéristiques de la fenêtre <i>Kaiser</i>	65
Figure 5.6 Efficacité de la fenêtre <i>Kaiser</i> pour éliminer les réflexions et atténuer les ondes directes de volume	66
Figure 5.7 Efficacité de la fenêtre <i>multiplication du signal par lui-même</i> pour éliminer les réflexions	68
Figure 5.8 Sélection des fréquences dont l'amplitude est supérieure à 20 % de l'amplitude maximale du spectre d'amplitude.	70
Figure 5.9 Sélection des fréquences pour lesquelles la variation de la vitesse relativement à la vitesse moyenne est inférieure à 5%.	71
Figure 5.10 Procédure de traitement des données	73
Figure 5.11 Courbes de dispersion obtenues pour les blocs 1, 2 et 3	76
Figure 5.12 Variation de la vitesse des ondes P avec la profondeur pour les bétons 1, 2 et 3	76
Figure 5.13 Courbe de dispersion obtenue sur le cube multicouche	79
Figure 5.14 Variation de la vitesse des ondes P avec la profondeur pour le bloc multicouche	79
Figure 5.15 Influence de la distance <i>RR</i> pour le béton 1	81
Figure 5.16 Influence de la distance <i>RR</i> pour le béton 2	81

Figure 5.17 Influence de la distance <i>RR</i> pour le béton 3	82
Figure 5.18 Influence de la distance <i>RR</i> pour le bloc multicouche	82
Figure 5.19 Influence de la distance <i>SR</i> sur le béton 1	87
Figure 5.20 Influence de la distance <i>SR</i> sur le béton 2	87
Figure 5.21 Influence de la distance <i>SR</i> sur le béton 3	88
Figure 5.22 Influence de la distance <i>SR</i> sur le bloc multicouche	88
Figure 5.23 Configuration de mesure pour une distance source-premier récepteur de 0 cm	89
Figure 5.24 Influence de la source sur les courbes de dispersion du béton 1	92
Figure 5.25 Influence de la source sur les courbes de dispersion du béton 2	92
Figure 5.26 Influence de la source sur les courbes de dispersion du béton 3	93
Figure 5.27 Influence de la source sur les courbes de dispersion du bloc multicouche	93
Figure 5.28 Comparaison des signaux obtenus avec 2 sources : transducteur et la bille C	94
Figure 5.29 Courbe de dispersion obtenue sur le béton 3 avec le transducteur	95
Figure 5.30 Influence de la discontinuité verticale 1 sur les courbes de dispersion	96
Figure 5.31 Influence de la discontinuité verticale 2 sur les courbes de dispersion	97
Figure 5.32 Influence de la discontinuité verticale 3 sur les courbes de dispersion	98
Figure 5.33 Influence de la discontinuité horizontale 1 sur les courbes de dispersion	99
Figure 5.34 Influence de la discontinuité horizontale 2 sur les courbes de dispersion	100
Figure 6.1 Vue générale de l'aménagement Chutes Hemming	103
Figure 6.2 Photographie de la cloison gauche de l'aménagement Chutes Hemming	104
Figure 6.3 Caractéristiques de la cloison gauche entre les chaînages 0+000 m et 0+010 m	106
Figure 6.4 Caractéristiques des positions d'essais le long du chaînage 0+009 m	108
Figure 6.5 Configuration de mesure et discrétisation du milieu en plusieurs cellules	109
Figure 6.6 Disposition de la source et des récepteurs lors d'un essai de tomographie (deuxième série d'essai avec la source à sa position 4 sur le côté Est)	111
Figure 6.7 Configuration des essais de tomographie	111
Figure 6.8 Photographie du lieu de prélèvement des carottes	113
Figure 6.9 Photographies des carottes A, B et C	114
Figure 6.10 Configuration de mesure d'un essai sonique	115

Figure 6.11 Exemple de signaux obtenus lors des essais de tomographie associée à l'ASOS	117
Figure 6.12 Signaux non filtrés obtenus pour la position 1 du chaînage 0+009 m	118
Figure 6.13 Courbes de dispersion obtenues avec la bille et le marteau pour quelques positions du chaînage 0+009 m.	119
Figure 6.14 Courbes de dispersion obtenues pour la position 1, 2 et 3 en utilisant la bille	120
Figure 6.15 Courbes de dispersion obtenues pour la position 4, 5 et 6 en utilisant la bille	121
Figure 6.16 Courbes de dispersion obtenues pour la position 7, 8, 9 et 10 en utilisant la bille	121
Figure 6.17 Courbes de dispersion obtenues lors des essais de tomographie pour la série 1, position 1 et 2 de la source	123
Figure 6.18 Courbes de dispersion obtenues lors des essais de tomographie pour la série 2, position 3 et 4 de la source	124
Figure 6.19 Vue en coupe du résultat des mesures de tomographie réalisées sur la face aval du barrage (l'échelle des vitesses varie de la couleur orange à la couleur verte)	125
Figure 6.20 Vu du béton de réparation et du béton de masse	127
 Figure A1-1 Cube homogène	 140
Figure A1-2 Cube multicouche	140
 Figure A2-1 Visualisation des signaux à traiter	 141
Figure A2-2 Visualisation des signaux non filtrés et filtrés	142
Figure A2-3 Spectre en fréquence d'amplitude de l'interspectre des signaux non filtrés et filtrés	143
Figure A2-4 Spectre d'amplitude de l'interspectre des signaux non filtrés et filtrés	143
Figure A2-5 Variation de la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh en fonction de la fréquence et courbe de dispersion	144

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 Caractéristiques mécaniques des mélanges utilisés à 28 jours	39
Tableau 5.1 Caractéristiques dynamiques des bétons utilisés	77
Tableau 6.1 Caractéristiques des carottes prélevées	113
Tableau 6.2 Caractéristiques des carottes prélevées sur la cloison gauche	128
Tableau 6.3 Résultats des essais soniques	129
Tableau 6.4 Classification du béton en fonction de la vitesse	130
Tableau 6.5 Récapitulatifs des résultats obtenus en laboratoire	131
Tableau A1-1 Caractéristiques des mélanges de béton à l'état frais lors de la fabrication des modèles.	139

ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

ASOS	Analyse Spectrale des Ondes de Surface
ACI	American Concrete Institute
BHP	béton haute performance
dB	décibel
E	module de Young
E/C	eau sur ciment
FFT	Fast Fourier Transform
GPa	GigaPascal
G_{xy}	intéspectre entre deux signaux X et Y
Hz	hertz
kg/m³	kilogramme par mètre cube
km/h	kilomètre par heure
KHz	kilohertz
l/m³	litre par mètre cube
m	mètre
MPa	Megapascal
MHz	megahertz
mm	millimètre
m/s	mètre par seconde
RR	distance entre récepteurs
s	seconde
SR	distance entre source et premier récepteur
V_P	vitesse des ondes de compression
V_R	vitesse des ondes de Rayleigh
V_S	vitesse des ondes de cisaillement
ε_r	constante diélectrique relative
λ	longueur d'onde

π	pi (=3,14)
ϕ	phase
f	fréquence
ν	coefficient de Poisson
ρ	masse volumique
γ	fonction de cohérence

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Le béton s'est imposé comme un matériau de choix pour la construction des bâtiments et des ouvrages : résistant à l'eau, façonnable, économique, il requiert de plus une maintenance réduite. Toutefois, il réagit en permanence avec le milieu environnant (température, gaz, sels agressifs, etc) et vieillit. De nos jours, le nombre d'infrastructures concernées par le vieillissement et par la dégradation est très important. Face à ce problème, il apparaît que de nombreux ouvrages doivent être réparés. Cependant, avant d'entreprendre des travaux coûteux de réfection, pour sauvegarder et réhabiliter ces ouvrages, il convient de se poser des questions : quelle est l'origine des désordres, leur étendue, leur évolution probable, leurs conséquences sur la sécurité des ouvrages ? Ces derniers sont-ils réparables et quelles sont les meilleures solutions de réparation ou de protection ? Des méthodes de diagnostic se proposent d'y répondre afin de les entretenir de façon efficace et économique. Pour réaliser un diagnostic précis, l'auscultation par des techniques non destructives est un outil indispensable.

Toutefois la dégradation des infrastructures concerne principalement le béton de surface (jusqu'à 1 m de profondeur) car c'est ce béton qui souffre le plus des conséquences de la fatigue thermique, du gel-dégel et de l'attaque des sulfates. La propagation de ces dégradations et, par la suite, de la perte des propriétés mécaniques du matériau sont très progressives et peuvent atteindre des proportions critiques à long terme pour les éléments structuraux des infrastructures de génie civil.

Les méthodes de réparations consistent à restaurer le béton plus ou moins endommagé en "béton rénové" en essayant de conserver au maximum la structure initiale. Une question importante se pose alors concernant la qualification de l'endommagement en surface et la détermination de son étendue en profondeur. En effet, une surestimation du matériau endommagé engendre des surcoûts de réparation et sa sous-estimation peut affecter sérieusement la durabilité de ces réparations (risque de décohésion). À l'heure actuelle, il n'existe aucun moyen qui puisse fournir

une réponse satisfaisante au problème de la définition de l'endommagement de surface (sévérité, extension). Il en résulte que l'épaisseur du matériau remplacé est, dans la majorité des cas, laissée au jugement de l'ingénieur de chantier : il y a donc un réel besoin de disposer d'outils d'auscultation pour répondre à cette problématique.

Il existe de nombreuses techniques non destructives (essai sonique, impact écho, tomographie sonique) capables d'estimer la qualité du béton. Toutefois, ces méthodes ne sont performantes que pour caractériser les changements qualitatifs au sein de la structure et non à la surface, de plus leur application impose l'accès à au moins deux faces de l'ouvrage ce qui n'est pas toujours possible, notamment dans le cas de l'auscultation d'un parement de barrage. Néanmoins, il existe une technique non destructive appelée Analyse Spectrale des Ondes de Surface (ASOS) qui semble sensible à la qualité du matériau de surface et dont l'application ne nécessite l'accès qu'à une seule face de la structure. La technique d'ASOS a été développée et utilisée sur des chaussées et des sols. Elle a montré des aptitudes pour estimer la qualité des couches composant ces milieux et leur épaisseur. Cependant cette technique a été très peu utilisée sur le béton.

L'objectif principal de cette étude est de développer l'application de la technique d'Analyse Spectrale des Ondes de Surface pour caractériser la détérioration superficielle du béton. Pour répondre à cet objectif, cette étude porte sur des travaux réalisés en laboratoire et en chantier. Les objectifs des travaux de laboratoire sont :

- Étudier la sensibilité de la technique aux variations de la qualité du béton;
- Étudier l'aptitude de la technique à détecter et à caractériser les variations, selon la profondeur, des propriétés d'un béton endommagé en surface;
- Comparer les résultats d'essais réalisés avec la technique d'ASOS aux résultats de l'essai sonique;
- Étudier l'influence des discontinuités présentes dans le béton sur la propagation des ondes de surface; Évaluer l'aptitude de la technique à les détecter;
- Examiner l'influence des paramètres d'essais sur les résultats;
- Optimiser la procédure d'essai pour des applications sur le béton.

Quant à l'application de la technique en chantier, ses objectifs sont de mettre en œuvre la technique sur une structure en service, d'acquérir une expérience de terrain, d'utiliser la technique

suivant la même procédure définie en laboratoire et d'explorer son aptitude à évaluer l'état d'un béton ayant subi un vieillissement naturel

Ce mémoire est organisé en six chapitres. Le chapitre 2 aborde la nécessité de l'auscultation dans le domaine du génie civil et décrit les principales techniques non destructives utilisées, leurs avantages et limitations. Après un bref rappel sur les phénomènes de propagation des ondes mécaniques, la technique d'ASOS est présentée dans le chapitre 3. Une synthèse des travaux de recherches sur cette technique est également donnée dans ce même chapitre. Cette partie résume les nombreuses applications de la technique sur les sols et les chaussées ainsi que les quelques études réalisées sur des structures en béton.

Le chapitre 4 concerne le programme expérimental établi en laboratoire. Les équipements et configurations de mesures ainsi que la procédure de traitement des données adoptés lors des essais de laboratoire sont décrits dans ce même chapitre. Les résultats des essais de laboratoire sont présentés et discutés dans le chapitre 5. Le chapitre 6 est consacré au travail réalisé en chantier. Enfin, les principales conclusions et recommandations concernant ce travail sont présentées dans la dernière partie de ce rapport de recherche.

CHAPITRE 2

L'AUSCULTATION DANS LE DOMAINE DU GÉNIE CIVIL

2.1. La nécessité de l'auscultation

Le vieillissement des structures en béton (ponts, chaussées, barrages...) se manifeste par une dégradation des qualités mécaniques, physiques et chimiques du matériau. Ces dégradations ont des origines diverses tel que le gel-dégel, la fatigue thermique, le retrait excessif, l'attaque des sulfates et des alcalis et la corrosion des armatures. Elles ont pour conséquences communes la fissuration et l'altération du béton, ce qui engendre une réduction de la capacité structurale de ce matériau.

Le vieillissement des infrastructures civiles atteint aujourd'hui des proportions alarmantes. Un montant approximatif de 100 milliards de dollars serait nécessaire afin d'améliorer uniquement l'état des routes, ponts et systèmes d'évacuation des eaux usées et de distribution d'eau gérés par les municipalités canadiennes. Au Québec, près de 40% des centrales hydroélectriques [Ballivy et Rhazi, 1993] ont atteint un état de vieillissement nécessitant des réfections. Auparavant, une évaluation préalable de l'état des structures de manière assez précise est nécessaire pour mener des interventions de réparations efficaces et diminuer leur coût. L'auscultation s'avère un outil indispensable pour atteindre cet objectif. Les dépenses occasionnées par ces investigations préliminaires sont rapidement amorties avec les économies réalisées sur les coûts de réparation.

Durant de nombreuses années, la seule technique d'auscultation utilisée et considérée comme satisfaisante par l'ingénieur civil consistait à prélever des carottes de la structure. De nombreux essais de laboratoire sont effectués sur ces carottes pour déterminer les propriétés du béton. Le carottage sera certainement toujours requis, ne serait ce que pour déterminer la résistance à la compression du béton. Cependant, la nature destructive de cette pratique, les coûts importants induits ainsi que le caractère ponctuel des résultats de cet essai ont exigé le développement de techniques non destructives pour une évaluation globale et à moindre coûts des matériaux.

Le but principal des techniques non destructives, telles qu'elles sont appliquées au béton, est de fournir à l'ingénieur une évaluation de la qualité du matériau, au sein même de la structure. En plus de leur aptitude à estimer la qualité des matériaux, les techniques non destructives sont également utilisées pour évaluer d'autres caractéristiques de la structure, telles que la détection et la caractérisation des discontinuités (fissures, vides). Ces dernières années, la prise de conscience par les exploitants des structures de l'importance de la durabilité du béton a donné à l'auscultation un autre rôle que celui d'évaluer la qualité du béton et de quantifier l'ampleur des défauts avant réparation. L'auscultation est en effet aussi considérée comme un moyen de contrôle de la qualité des réparations et de suivi de leur évolution dans le temps. Dorénavant, l'auscultation fera partie intégrante du génie civil. Les ingénieurs devront faire appel aux techniques non destructives afin d'évaluer l'état d'une « vieille » structure ou de suivre le comportement des structures nouvelles.

2.2. Les principales techniques non destructives

Les méthodes non destructives peuvent être divisées en deux groupes : celles qui permettent d'estimer les propriétés mécaniques du béton sur le site même, et celles qui sont capables de détecter et de caractériser les discontinuités dans le béton. La figure 2.1 énumère les principales méthodes utilisées actuellement pour le contrôle non destructif du béton.

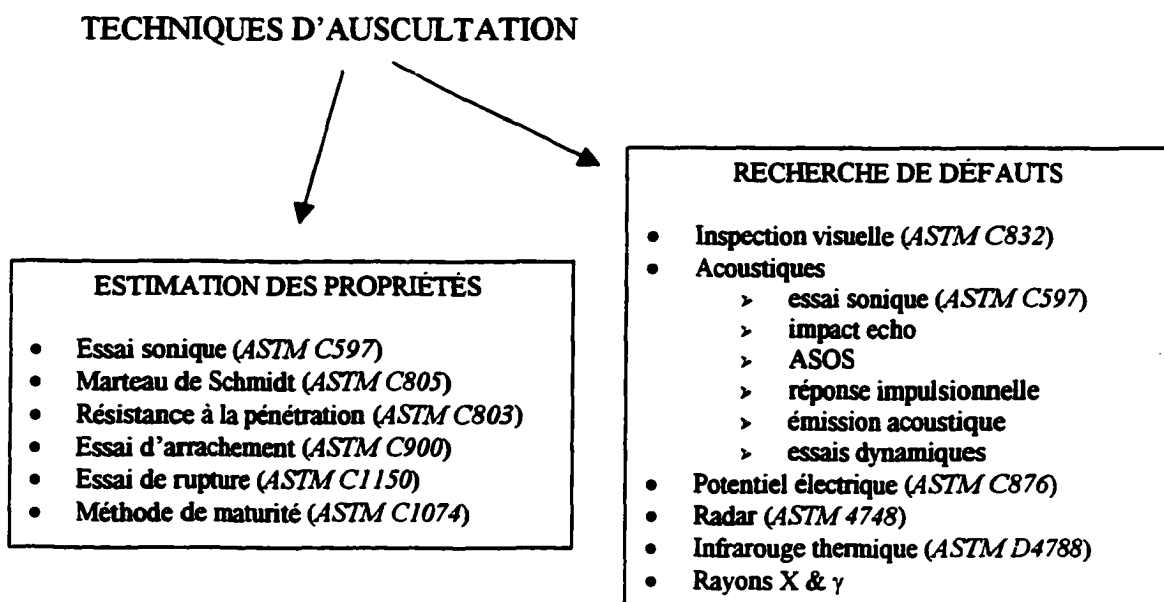


Figure 2.1 Les principales techniques d'auscultation

Les méthodes permettant l'estimation des propriétés mécaniques du béton ont pour la plupart été développées durant les années 1940 et elles sont aujourd'hui normalisées. Ces techniques consistent à mesurer la dureté de surface du béton et à la corrélérer avec la résistance à la compression. Les premières utilisations de ces méthodes ont concerné le suivi sur chantier du développement de la résistance du béton à jeune âge. Parmi ces techniques, on peut citer le marteau rebondissant, l'essai de résistance à la pénétration, l'essai de rupture et l'essai d'arrachement (Figure 2.2). L'historique et le développement de ces méthodes sont largement décrits dans la documentation [Bungey, 1989; Malhotra V.M., 1976; Malhotra et col, 1991].

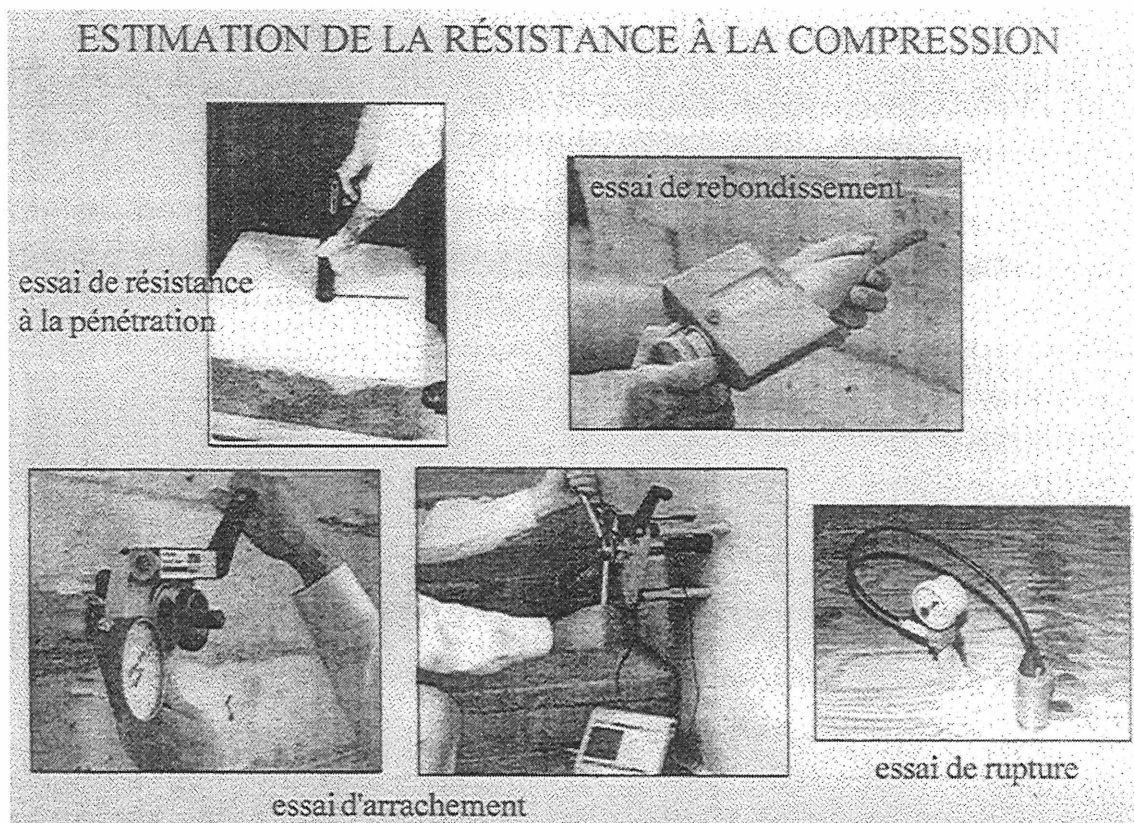


Figure 2.2 Quelques techniques permettant l'estimation de la résistance à la compression

La seconde catégorie des méthodes non destructives est utilisée pour l'évaluation de l'état des structures existantes par le biais de l'interaction des ondes (électromagnétiques, thermiques ou mécaniques) avec les discontinuités dans le béton (fissures, vides, délaminages). Quelques-unes de ces méthodes sont présentées ci-dessous en distinguant les techniques utilisant les ondes mécaniques des autres techniques. Il est à signaler que, contrairement aux essais permettant

l'estimation des propriétés mécaniques du béton, les techniques de détection des défauts dans le béton sont relativement nouvelles et sont pour la plupart non normalisées. Cependant, il existe des guides concernant les conditions de leurs utilisations [ex : ACI 364.1R.94].

2.2.1. Les méthodes acoustiques.

Les méthodes acoustiques utilisent la propagation des ondes mécaniques pour décrire les propriétés du matériau. Elles ont connu un développement considérable au cours des dix dernières années. Ceci peut s'expliquer par le fait que la vitesse de propagation des ondes mécaniques est liée aux propriétés mécaniques du béton, notamment le module d'élasticité et le coefficient de Poisson. Par ailleurs, les ondes mécaniques sont sensibles aux discontinuités, et elles sont moins affectées par les conditions environnementales et par l'état physique des matériaux (humidité, température). Parmi ces techniques, on peut citer l'essai sonique et l'impact écho.

L'essai sonique, dont l'application au béton date des années 1940 [Almedia, 1991], est un moyen non destructif pertinent pour estimer la qualité et l'uniformité du matériau. L'idée est de mesurer le temps (t) et donc la vitesse moyenne (V) de propagation des ondes à travers un matériau (Figure 2.3). Cette vitesse permet d'évaluer la qualité et de déterminer les constantes élastiques dynamiques du matériau.

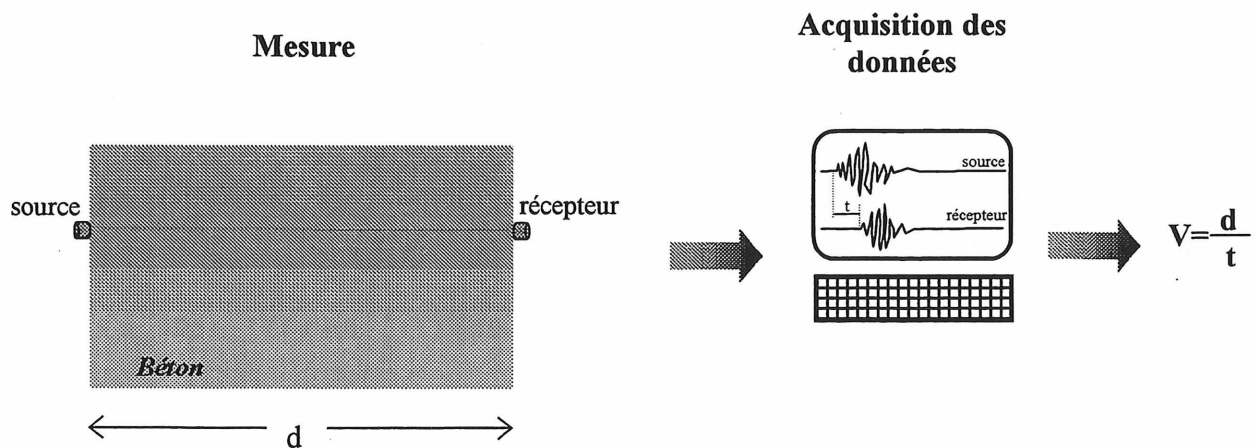


Figure 2.3 Principe de l'essai sonique

L'essai sonique est couramment utilisée sous forme de cross-hole. Ceci consiste à déterminer, pour différentes profondeurs, la vitesse de propagation des ondes entre deux forages afin d'estimer les variations des propriétés mécaniques en fonction de la profondeur ou pour contrôler la qualité de la mise en place du béton dans les pieux.

L'impact écho est une technique qui a été développée au cours des années 1980 [Sansalone et Carino, 1986]. Le principe de la technique est illustré sur la figure 2.4. Un choc mécanique de courte durée est appliqué à la surface du matériau de la structure. Les ondes qui se propagent à travers le matériau sont réfléchies en particulier par les fissures. La réponse temporelle de la structure à l'impact est enregistrée par un récepteur qui se trouve à la surface.

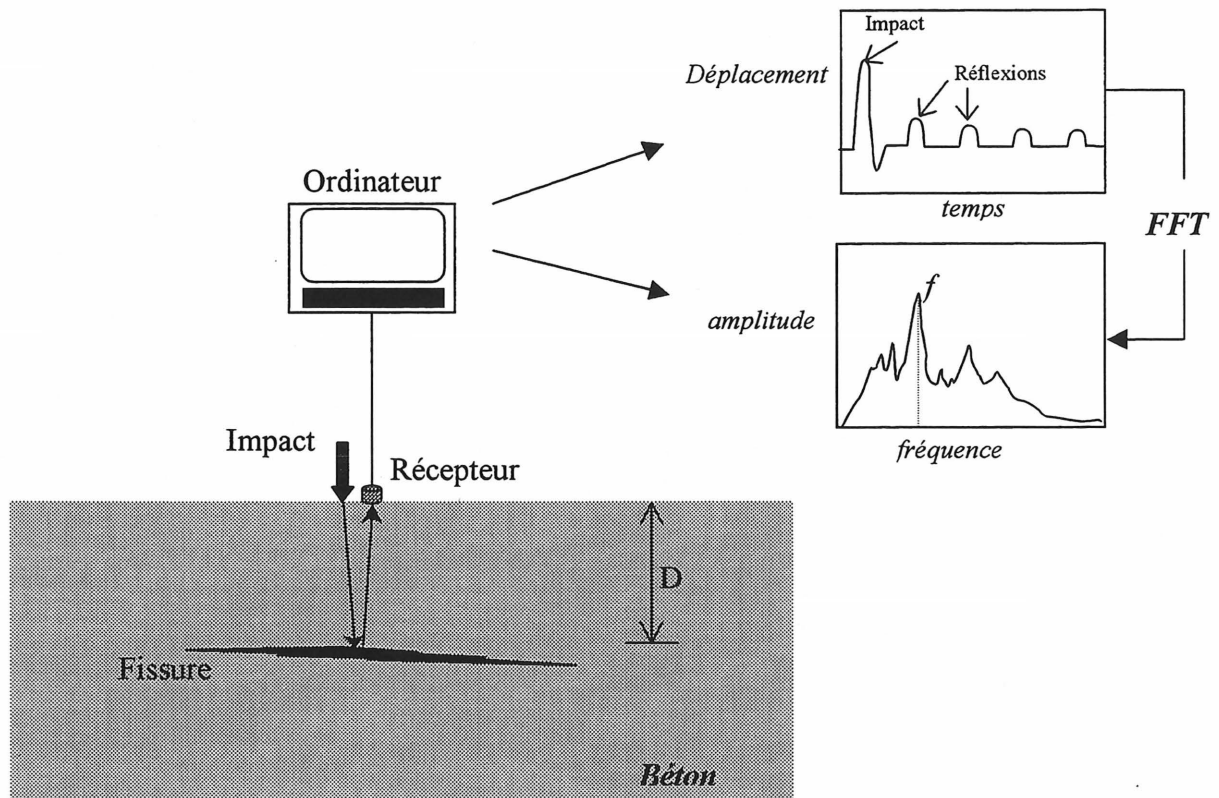


Figure 2.4 Principe de l'impact écho

La technique considère que les ondes réfléchies à la surface, par une discontinuité, seront périodiques et de fréquence dominante f . Celle-ci peut être déterminée en transformant la réponse du domaine temporel au domaine des fréquences à l'aide d'une fonction mathématique (FFT).

Connaissant la vitesse moyenne (V) de propagation des ondes dans le béton, il est possible de déterminer la profondeur D de la fissure ou du défaut avec la relation suivante :

$$D = V / (2f) \quad (2-1)$$

La technique donne des résultats satisfaisants dans le cas de l'auscultation de structures de grandes tailles tel que des pieux et des barrages [Tanicone, 1991, Olson et coll., 1990] mais également sur des dalles et des poutres [Lin et Sansalone., 1992]. Quelques références [Tanicone, 1991; Carino et coll., 1991; Sansalone et coll., 1988] relèvent l'aptitude de l'impact écho à détecter un grand nombre de défauts, tels les délaminages, les vides, les fissures et les joints froids ainsi que pour mesurer des épaisseurs de béton. L'intérêt de la technique est qu'elle est rapide, simple et ne nécessite l'accès qu'à une seule face de la structure.

2.2.2. La technique radar et la thermographie infrarouge

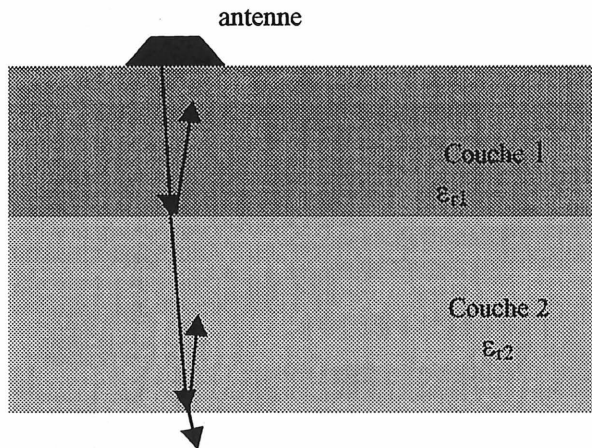
a) La technique radar

La technique radar (RAdio Detection And Ranging) est analogue à l'échographie ultrasonore (ou sonar) utilisée pour la prospection des fonds sous marins. Son principe repose sur la réflexion de l'énergie lorsque l'onde électromagnétique rencontre un contraste diélectrique.

L'instrumentation utilisée comprend une antenne émettrice/réceptrice et des appareils de stockage et de visualisation des relevés. L'antenne est disposée sur la surface de la structure à tester. Une onde électromagnétique est émise et se propage à travers le matériau. Lorsque l'onde rencontre une interface entre deux milieux différents, une partie de l'énergie est réfléchi vers la surface et l'antenne la reçoit comme un écho. En mesurant le temps entre l'émission de l'onde jusqu'à la réception de l'écho, il est possible de déterminer la profondeur de l'interface. L'amplitude de réflexions à l'interface dépend de la différence entre les constantes diélectriques des deux matériaux ou des deux milieux. Ces constantes sont sensibles à l'humidité et à la concentration ionique. Le principe de l'opération radar est illustré sur la figure 2.5.

En génie civil, l'application de la technique radar au diagnostic du béton concerne principalement la détection de la dégradation dans les dalles de tablier de ponts [Ranson et Kung, 1986, Cantor, 1984], la localisation des armatures dans des structures [Clemena, 1983] et la mesure de l'épaisseur des chaussées [ASTM D 4748]. Ces essais ne sont toutefois pas normalisés, car les

résultats restent difficiles à interpréter, notamment dans le cas de la présence d'armatures multiples [Arcone, 1989; Mast, 1990]. La technique radar est prisée par les gestionnaires des routes et des ponts, car elle offre l'avantage de laisser les voies de circulation ouvertes en faisant les relevés à partir d'un véhicule mobile.



Matériau	ϵ_r^{**}
Air	1
Béton*	6 à 11
Béton bitumineux*	3 à 5
Gravier*	5 à 9
Sable*	2 à 6
Roche*	6 à 12
Eau	80

* ASTM D 4748

** Constante diélectrique relative

Figure 2.5 Réflexions et transmissions du signal radar à l'interface entre deux matériaux

b) La thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est basée sur le principe suivant : une anomalie (vide, fissure), ayant une conductivité thermique plus faible que le matériau l'entourant perturbe le flux de chaleur et modifie la distribution de la température à la surface du matériau. En mesurant la température de surface, la présence d'une anomalie peut donc être détectée. Cependant, l'application de la technique nécessite la présence d'un flux de chaleur à travers le matériau. Les conditions de flux de chaleur peuvent être créées en utilisant des lampes puissantes ou en utilisant tout simplement la chaleur naturelle du soleil, ce qui est d'ailleurs plus économique. Dans ce dernier cas, le moment idéal pour effectuer les mesures est quelques heures après le lever du soleil ou après le coucher du soleil (Figure 2.6). C'est à ce moment là que les flux de chaleur sont les plus importants. La différence de température en surface est alors mesurée avec une caméra infrarouge thermique (scanner), système similaire à une caméra vidéo, qui mesure la quantité de radiation infrarouge émise par une surface. Le principe, ainsi qu'un exemple d'application de la technique, sont illustrés sur la figure 2.6. On constate que la différence de température entre une zone de béton intacte et une zone délaminée peut atteindre plus de 4°Celsius à une certaine période de la journée (dans ce cas-ci, entre 10 heures et 18 heures).

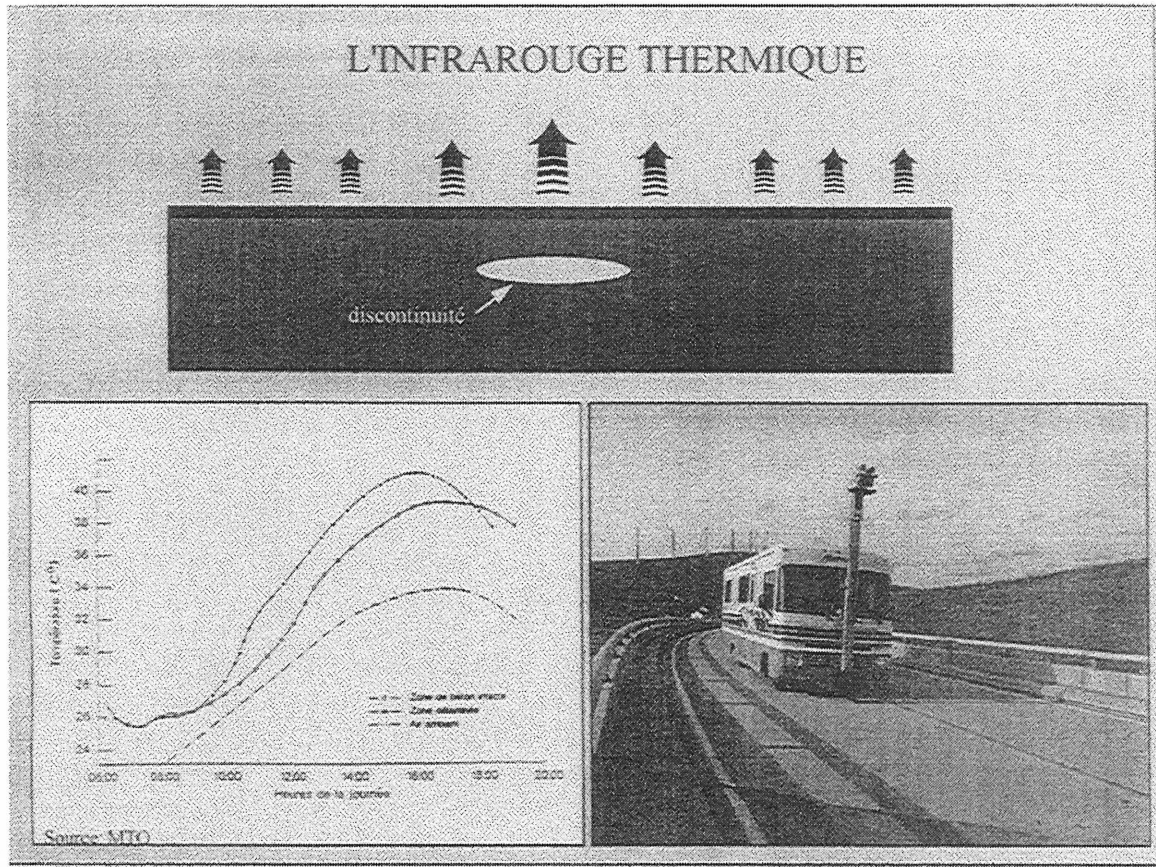


Figure 2.6 La thermographie infrarouge [Holf, F.B. et Eales, J.W., 1987]

En génie civil, les principales applications de la technique sont la détection des délaminages dans les ponts [Holf, F.B. et Minning, D.G., 1978, Holf, F.B. et Eales, J.W., 1987]. La majorité des travaux de recherches a été réalisée par le ministère des transports et de la communication de l'Ontario [Moore, 1973]. En 1988, une norme [ASTM Standard 4788] a été publiée concernant la localisation de la délamination dans des dalles de tablier de ponts en béton. Comme pour la technique radar, l'infrarouge thermique ne contraint pas l'exploitant à interrompre la circulation routière. Les essais peuvent être réalisés à partir d'un véhicule se déplaçant à une faible vitesse (inférieure à 15 km/h). C'est ainsi que l'autoroute Dan Ryan de Chicago (29,8 km, 220 000 véhicules/jour) a pu être contrôlée en l'espace de 70 heures [Tanicone, P., 1991].

2.3. Conclusion

Dans ce chapitre, différentes techniques non destructives ont été décrites. Ces dernières présentent de nombreux avantages mais leur efficacité à évaluer les caractéristiques d'une

structure est liée à la problématique considérée. En effet, les techniques radar et thermique sont essentiellement utilisées pour la détection de défauts dans le matériau (ex : délamination). Quant aux techniques acoustiques, elles sont davantage utilisées pour estimer les propriétés et l'uniformité du béton, compte tenu des relations établies entre la vitesse de propagation des ondes acoustiques et de la qualité du matériau.

En général, toutes ces techniques permettent une évaluation qualitative et comparative de la qualité du béton. Des informations supplémentaires sur les principales techniques non destructives utilisées en génie civil sont données par G. Ballivy et col. (1993) et Y. Kharrat (1997).

CHAPITRE 3

LA MÉTHODE D'ANALYSE SPECTRALE DES ONDES DE SURFACE

Étant donné que de nombreuses méthodes non destructives, dont l'analyse spectrale des ondes de surface, reposent sur la propagation des ondes mécaniques dans le matériau, il est approprié de rappeler certaines notions de base sur ces ondes.

3.1. Propagation des ondes mécaniques

Une onde est une propagation d'énergie dans un milieu, qui pour chaque point du milieu reproduit le mouvement de la source, mais sans transfert de matière. Un milieu ne peut être le siège d'une onde que s'il est élastique, c'est à dire si tout élément de volume subissant une déformation (donc une contrainte) est capable de transmettre son énergie à un élément voisin. Parmi les milieux considérés élastiques on trouve l'eau, l'air, l'acier et le béton. Dans un milieu solide semi infini les ondes élastiques se propagent essentiellement sous la forme d'ondes de volume et d'ondes de Rayleigh. Une onde, de volume ou de Rayleigh, est caractérisée par sa longueur d'onde λ et sa fréquence f . La longueur d'onde diminue lorsque la fréquence augmente. Quant à la vitesse (V) de propagation de l'onde elle peut être déterminée par la relation suivante :

$$V = \lambda \cdot f \quad (3-1)$$

Des informations supplémentaires concernant la propagation des ondes sont données par Fouillé (1960) et Lecerf (1986).

3.1.1. Les ondes de volume

Les ondes de volume se propagent à l'intérieur des milieux et englobent les ondes longitudinales et les ondes transversales. Les ondes longitudinales, que l'on appelle aussi ondes P ou ondes de compression, ont un mouvement de particules qui est parallèle à la direction de propagation (Figure 3.1). Ces ondes peuvent se propager dans l'eau, l'air et les solides. Leur vitesse est supérieure à celle des ondes transversales (ondes de cisaillement). Ces dernières ont un

mouvement des particules perpendiculaire à la direction de propagation (Figure 3.2). Elles ne peuvent se propager que dans les solides.

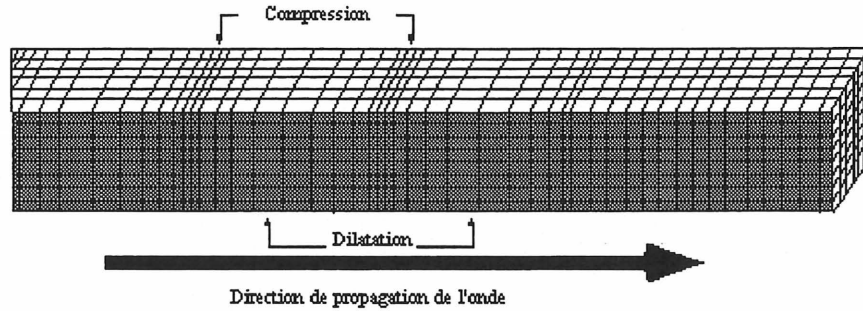


Figure 3.1 Propagation d'une onde de compression (onde P)

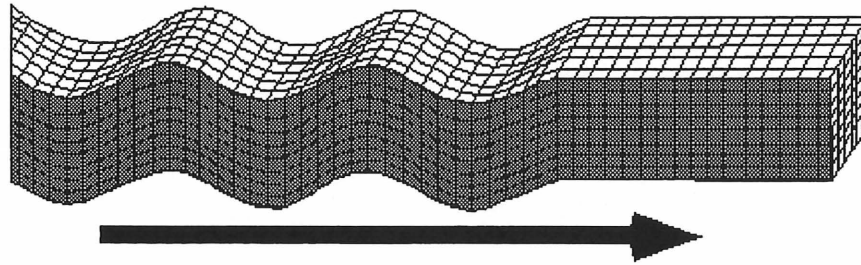


Figure 3.2 Propagation d'une onde de cisaillement (onde S)

La propagation des ondes de volume dans un milieu solide élastique et homogène dépend des caractéristiques mécaniques de ce milieu. Les vitesses de propagation des ondes P et S sont :

$$V_P = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3-2)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E_d}{2(1+\nu)\rho}} \quad (3-3)$$

où V_P : vitesse de propagation des ondes de compression (m/s)

V_S : vitesse de propagation des ondes de cisaillement (m/s)

E_d : module d'élasticité dynamique du milieu (Pa)

ν : coefficient de Poisson dynamique du milieu

ρ : masse volumique du milieu (kg/m^3)

À la surface de la terre ou d'un milieu semi infini, les ondes de volume peuvent être mises en évidence en observant un enregistrement sismique tel que celui donné sur la figure 3.3. Celui-ci décrit l'amplitude du mouvement des particules à la surface de la terre en fonction du temps lors du séisme du Mexique. Les premières arrivées d'énergie sismique correspondent aux ondes de volume qui ont pénétré profondément à l'intérieur du milieu. Le premier train d'onde apparaissant sur le sismogramme est celui de l'onde P suivi de celui de l'onde S. Les grands trains d'ondes oscillant arrivant en queue de sismogramme sont des ondes de Rayleigh.

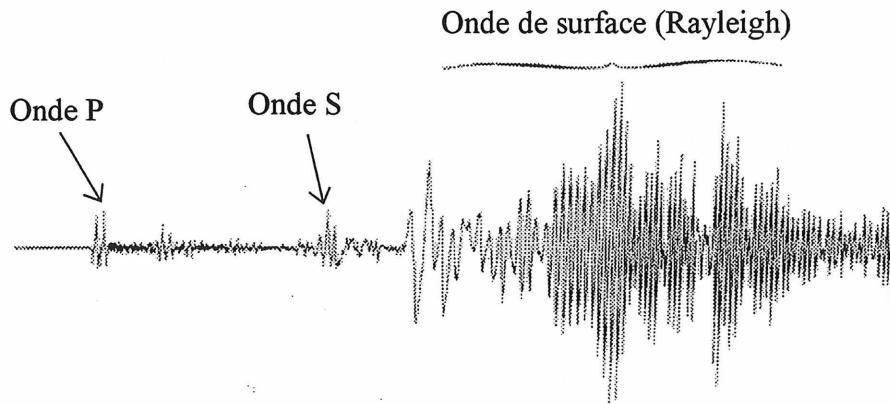


Figure 3.3 Séisme du Mexique du 19.09.1985 enregistré à Strasbourg (France)

3.1.2. Les ondes de Rayleigh

Il existe plusieurs types d'ondes de surface. Toutefois les ondes de surface associées à l'analyse spectrale des ondes de surface sont les ondes de Rayleigh en référence à Lord Rayleigh qui, mathématiquement, fût le premier à démontrer l'existence de ces ondes en 1885. Contrairement aux ondes de volume, les ondes de Rayleigh n'existent que dans un milieu semi infini (surface libre) tel une chaussée, un sol ou un parement de barrage. Ce type d'ondes est appelé ondes de surface parce qu'elles se propagent parallèlement à la surface et ont leur plus grande amplitude au voisinage de la surface.

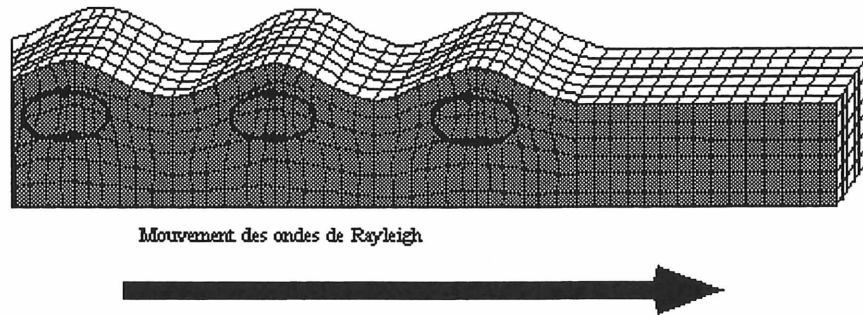


Figure 3.4 Propagation d'une onde de Rayleigh

L'onde de Rayleigh se propage à la surface du milieu suivant un front d'onde cylindrique. Le mouvement associé aux ondes de Rayleigh (Figure 3.4) est composé d'un déplacement horizontal (parallèle à la direction de propagation) et d'un déplacement vertical (perpendiculaire à la direction de propagation). La propagation de ces ondes fait donc intervenir des déformations de compression/dilatation accompagnées de déformations de cisaillement. Le mouvement des particules prend la forme d'une ellipse et tend à s'annuler pour des profondeurs sous la surface de l'ordre d'une longueur d'onde. La profondeur de pénétration de l'onde de Rayleigh est ainsi en rapport direct avec sa longueur d'onde. La figure 3.5 [Pecker, 1984] donne la variation avec la profondeur des amplitudes des déplacements horizontal et vertical pour un milieu dont le coefficient de poisson est de 0,25.

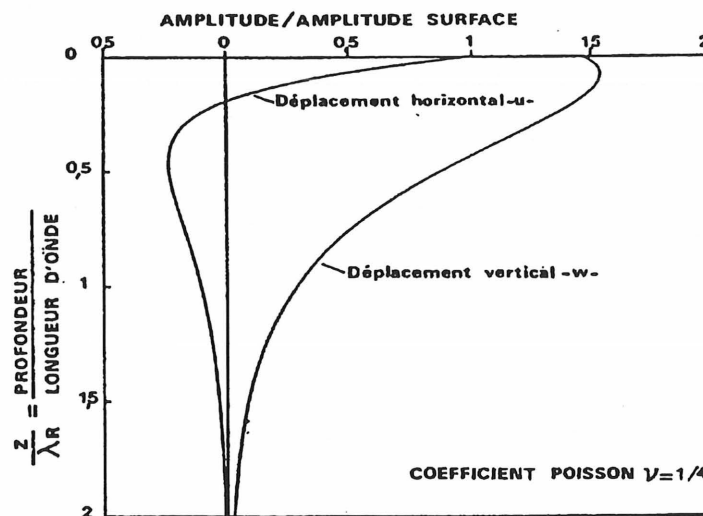


Figure 3.5 Déplacements dus aux ondes de Rayleigh en milieu élastique

Dans le cas où les ondes de Rayleigh se propagent dans un milieu homogène et isotrope, leur vitesse peut être estimée à partir de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement (V_s) et du coefficient de Poisson du milieu (ν) avec la relation suivante [Achenbach, 1973] :

$$V_R = \frac{0,862 + 1,14\nu}{1 + \nu} V_s \quad (3 - 4)$$

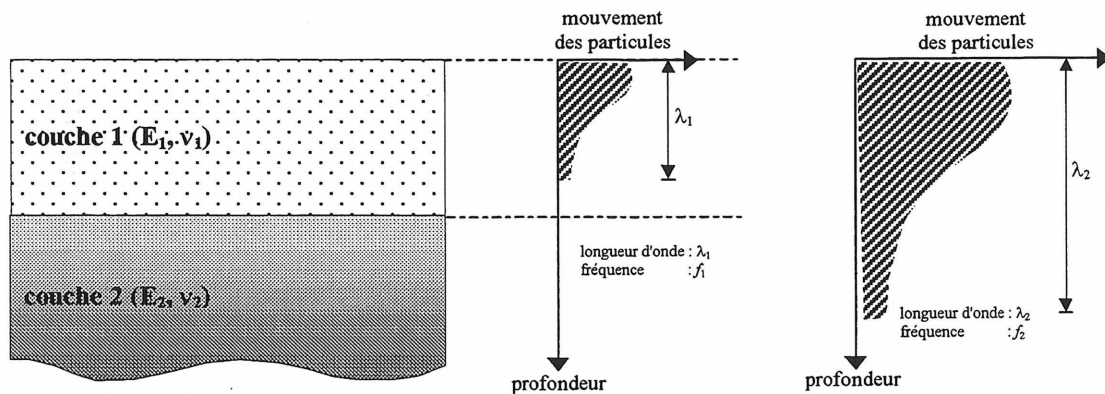
La vitesse des ondes de Rayleigh est plus faible que celles des ondes de volume. Généralement, on estime cette vitesse par la relation : $V_R \cong 0,91 V_s$ lorsque le coefficient de Poisson du milieu est compris entre 0,1 et 0,3.

3.1.3. Caractère dispersif des ondes de Rayleigh

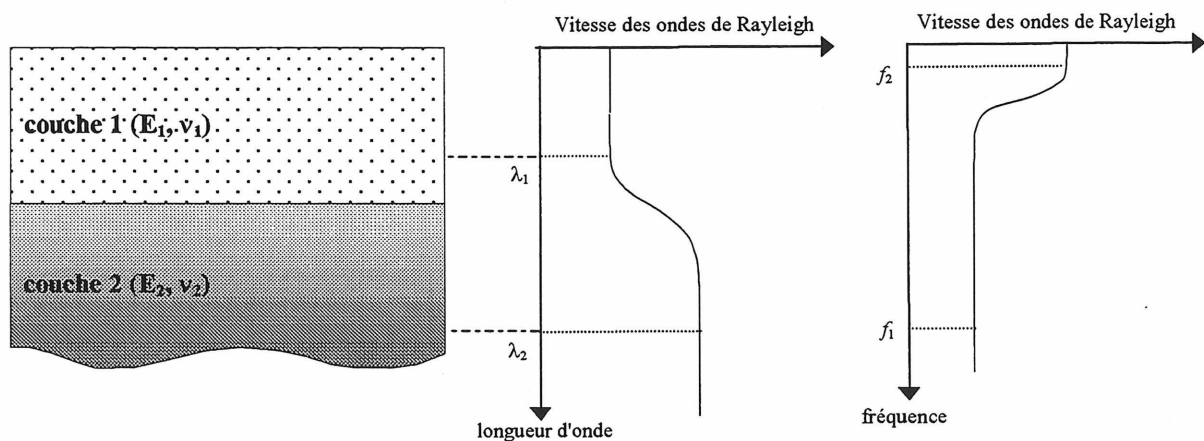
La méthode d'analyse spectrale des ondes de surface (ASOS) est basée sur l'émission, la détection et l'analyse des ondes de Rayleigh (ondes de surface). Cependant lorsqu'une énergie est générée par un mouvement à la surface, celle-ci est transmise au milieu sous forme d'ondes de Rayleigh mais également d'ondes de volume. Ces dernières se propagent à travers le milieu dans toutes les directions suivant un front d'onde sphérique. Par contre, leur atténuation est beaucoup plus importante que celle des ondes de Rayleigh. En effet, le long de la surface, les ondes de Rayleigh s'atténuent suivant une loi en $1/\sqrt{r}$ au lieu de $1/r^2$ pour les ondes de volume, où r est la distance séparant le front d'onde de la source [Wood, 1968]. D'autre part, lorsque l'énergie est transmise au milieu par un mouvement vertical à la surface, près de 67% de l'énergie générée est associée aux ondes de Rayleigh [Miller et Pursey, 1955]. Il est alors possible d'établir que les ondes de Rayleigh sont dominantes dans le mouvement de propagation détecté à la surface du milieu et que, pour des distances relativement importantes entre la source d'émission et les récepteurs, l'énergie associée aux ondes de volume est faible. La méthode d'ASOS considère cet aspect pour supposer que les mouvements détectés à la surface d'un milieu semi infini proviennent essentiellement des ondes de Rayleigh.

Une autre caractéristique des ondes de Rayleigh, exploitée par l'ASOS, est leur caractère dispersif. La profondeur de pénétration des ondes de Rayleigh est proportionnelle à leur longueur d'onde. Plus la longueur d'onde est grande, plus la profondeur de pénétration est importante. De ce fait, dans un milieu multicouche (Figure 3.6) l'onde de faible longueurs d'ondes (λ_1) qui est caractérisée par une haute fréquence (f_1), se propage à travers la couche supérieure du milieu. La

vitesse de cette onde est essentiellement influencée par les propriétés de cette couche. Quant à une onde de longueur d'onde plus grande (λ_2) et donc de basse fréquence (f_2), elle pénètre les couches profondes. La vitesse de l'onde sera une sorte de moyenne des vitesses dans l'intervalle de profondeur sur lequel pénètre l'onde, comme illustré sur la figure 3.6 où les propriétés de la couche 2 sont supérieures à celles de la couche 1. Par conséquent, la vitesse d'une onde de Rayleigh se propageant dans un milieu dont les propriétés varient avec la profondeur sera fonction de sa longueur d'onde et donc de sa fréquence, l'onde de Rayleigh est dite dispersive.



(a) Distribution approximative du mouvement vertical des particules en fonction de la profondeur pour deux ondes de Rayleigh de longueurs d'ondes différentes (λ_1, λ_2)



(b) Variation de la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh dans le milieu en fonction de la longueur d'onde et de la fréquence dans le cas où $E_2 > E_1$

Figure 3.6 Propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu multicouche

Par contre, les ondes de Rayleigh qui se propagent à travers un milieu isotrope et homogène ont une vitesse constante quelque soient leur longueur d'onde et leur fréquence, et le milieu est dit non dispersif (Figure 3.7).

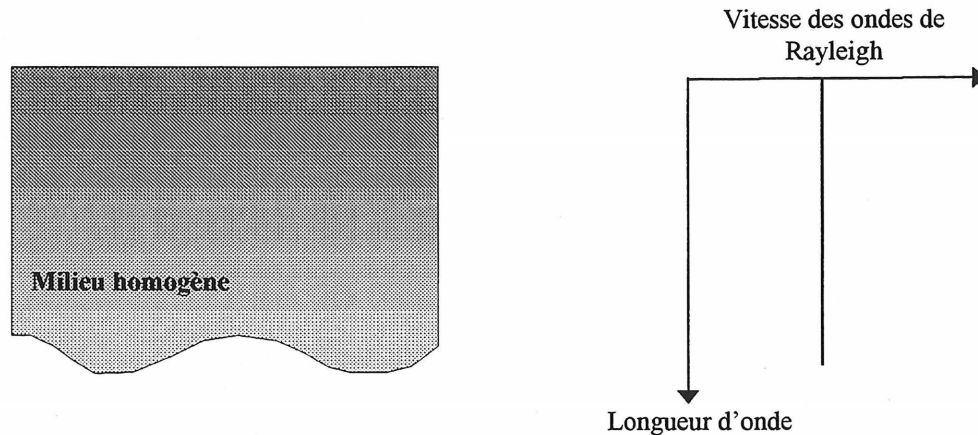


Figure 3.7 Propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu semi infini homogène

Connaissant les caractéristiques des ondes de Rayleigh, il est donc possible de décrire la variation des propriétés élastiques d'un milieu à partir des vitesses de propagation des ondes de Rayleigh pour différentes longueurs d'ondes. Une augmentation de la vitesse avec la longueur d'onde serait un signe de l'amélioration des propriétés du milieu avec la profondeur. Une diminution de la vitesse signifierait l'inverse. Afin de décrire l'évolution des caractéristiques d'un milieu en fonction de la profondeur, la méthode d'ASOS fait appel à une procédure de traitement des données pour construire une courbe expérimentale de la variation de la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh en fonction de la longueur d'onde, appelée courbe de dispersion (Figure 3.6-b).

3.2. Description de la technique d'analyse spectrale des ondes de surface

L'étude de la propagation des ondes de Rayleigh dans les matériaux de construction a débuté dès 1938 avec Degebo en Allemagne [Degebo, 1938]. Ses recherches ont montré, dans plusieurs cas, que la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh décroît avec l'augmentation de la fréquence (diminution de la longueur d'onde). Jones (1958) a par la suite repris ces recherches en introduisant la méthode «steady state». Cette méthode utilisait, comme source, un générateur de vibrations verticales de fréquence f . Un récepteur mesurait les vibrations à la surface alors que

les signaux émis et reçus étaient visualisés sur un oscilloscope. Le récepteur était progressivement éloigné de la source jusqu'à ce que les deux signaux visualisés soient en phase sur l'oscilloscope (Figure 3.8). La distance source-récepteur est alors égale à une longueur d'onde λ . Celle-ci correspond en fait à la distance que l'onde doit parcourir pour faire un cycle. La vitesse (V) de propagation de l'onde de fréquence f est déterminée avec la relation 3-1. L'essai est répété un certain nombre de fois, pour différentes fréquences afin d'obtenir une courbe de dispersion de la vitesse en fonction de la longueur d'onde.

De nombreuses études basées sur la méthode «steady state» ont été réalisées [Ballard, 1964; Maxwell et Fry, 1967] toujours avec le même but, celui de déterminer le profil de rigidité du sol ou des chaussées à partir de la surface. Cette méthode sera à la base de l'analyse spectrale des ondes de surface (ASOS) qui est décrite ci-dessous.

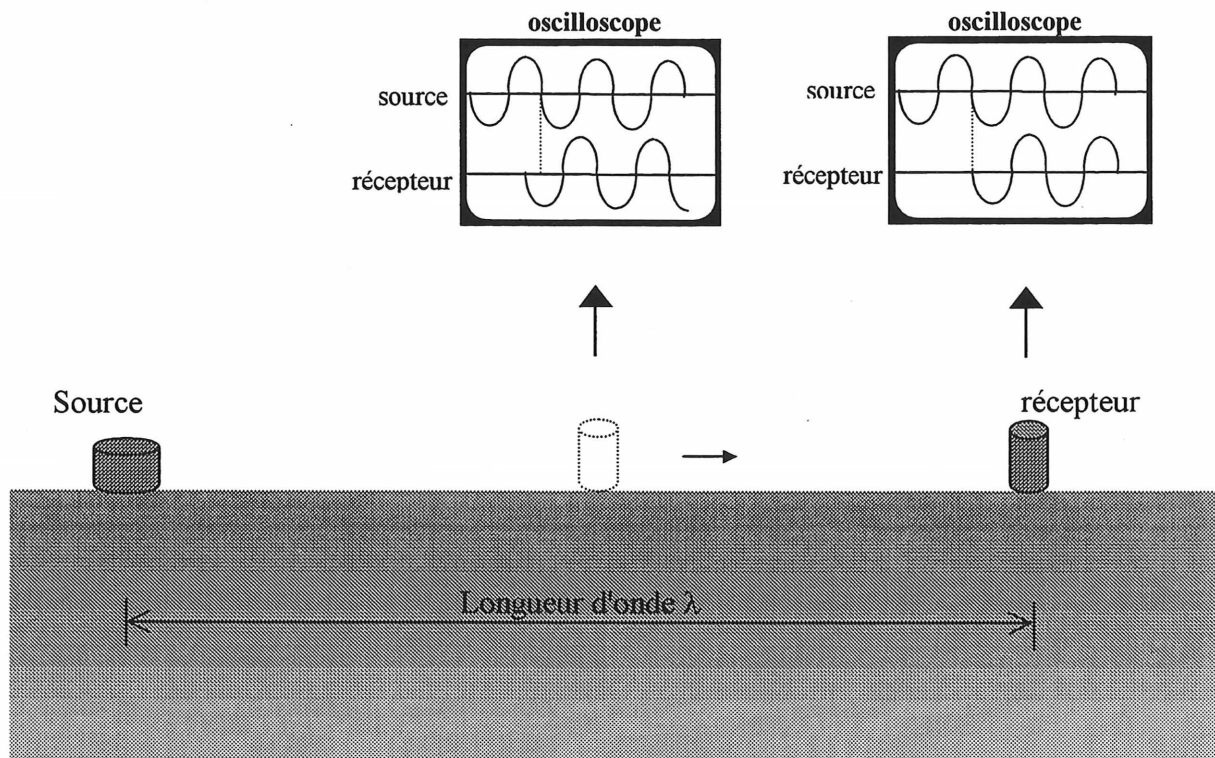


Figure 3.8 La méthode «steady state»

3.2.1. Configuration de mesure et principe de l'ASOS

La technique d'analyse spectrale des ondes de surface est basée sur le même principe que la méthode « steady state ». L'équipement exigé par la technique d'ASOS consiste en une source d'énergie, deux récepteurs et des instruments d'acquisition et de traitement des données. La source d'énergie et les récepteurs sont installés sur la surface du milieu à ausculter et suivant une même ligne (Figure 3.9). La distance séparant la source du premier récepteur est SR et celle séparant les deux récepteurs est RR . L'énergie générée par la source à la surface du milieu est détectée par les récepteurs pour être enregistrée sous forme de signaux dans le domaine temporel. Ceux-ci sont transformés dans le domaine des fréquences par le biais d'une fonction appelée : FFT (Fast Fourier Transform). Cette opération permet d'obtenir les spectres d'amplitude et de phase des signaux. En traitement de signal, cette étape est appelée analyse spectrale. L'ASOS utilise les informations apportées par les spectres d'amplitude et de phase du mouvement de particules engendré par les ondes de Rayleigh pour obtenir la courbe de dispersion du milieu d'où son appellation de méthode d'analyse spectrale des ondes de surface.

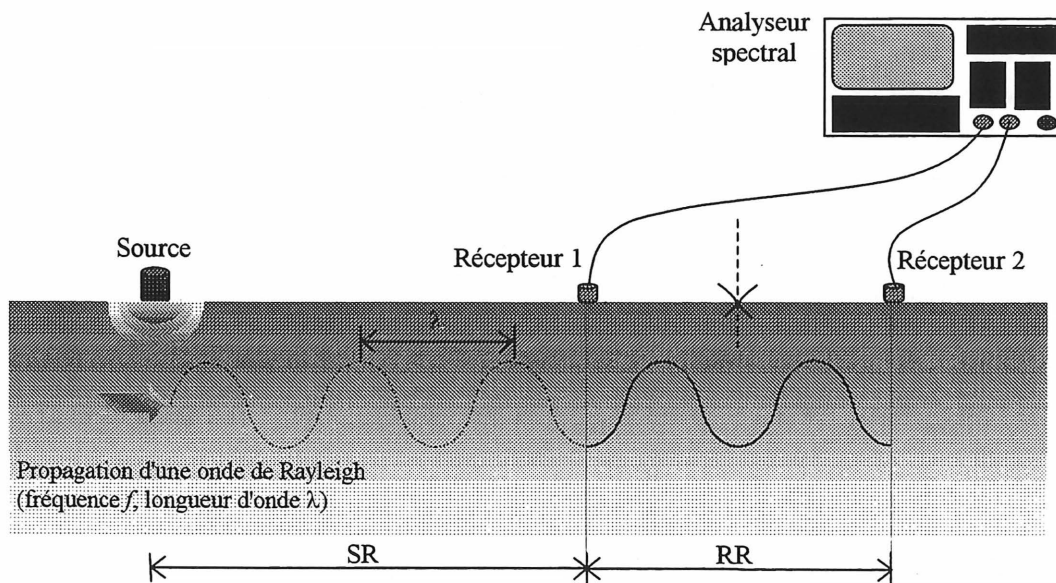


Figure 3.9 Configuration et équipement de mesure pour l'ASOS

La technique d'ASOS utilise principalement le spectre de phase des signaux enregistré avec les deux récepteurs pour calculer le temps de propagation et donc la vitesse des ondes de Rayleigh

entre les deux récepteurs et construire une courbe de dispersion. Pour illustrer cela, considérant un train d'ondes de Rayleigh émis par une source et qui se propage donc parallèlement à la surface (Figure 3.9). Lorsque la source et les deux récepteurs sont disposés sur une même ligne, alors le train d'onde provenant de la source et se propageant vers le premier récepteur atteint le second récepteur avec un certain retard t (Figure 3.9). Une onde de Rayleigh de fréquence f fait un cycle complet, ce qui correspond à une phase de 2π , en un temps de propagation égale à sa période T et donc en parcourant une distance égale à sa longueur d'onde λ . Le temps de propagation de l'onde entre les deux positions des récepteurs 1 et 2 peut alors être déterminé par la relation suivante, connaissant la phase de l'onde entre les deux positions :

$$t(f) = \frac{\phi(f)}{2\pi} T \quad (3-5)$$

où

f : fréquence (Hz)

$t(f)$: temps de propagation (s) de l'onde de fréquence f

$\phi(f)$: phase (radians) entre les deux positions pour une fréquence f

Le spectre de phase $[\phi(f)]$, ou phase, est calculé à partir des deux signaux, $x(t)$ et $y(t)$, détectés par les deux récepteurs. Il correspond à la différence de phase de l'onde entre les deux récepteurs et il est défini en traitement du signal comme étant l'interspectre (cross spectrum) G_{XY} tel que :

$$G_{XY} = X^*(f) \cdot Y(f) \quad (3-6)$$

où

$X(f)$: spectre en fréquence de $x(t)$

$Y(f)$: spectre en fréquence de $y(t)$

$(^*)$: conjugué complexe de la quantité

Pour déterminer le spectre de phase entre deux signaux, il suffit d'enregistrer, au même instant, deux signaux avec les deux récepteurs. Le spectre de phase donne la différence de phase pour toutes les fréquences contenues dans les deux signaux. Étant donné que la distance entre les deux récepteurs est fixe pour toutes les fréquences et égale à RR , alors la vitesse de propagation d'une

onde de Rayleigh (V_R), de fréquence f , et sa longueur d'onde correspondante (λ_R) seront déduites de sa phase $\phi(f)$ entre les deux positions par les relations suivantes :

$$V_R(f) = \frac{RR}{t(f)} = \frac{2\pi \cdot RR \cdot f}{\phi(f)} \quad (3-7)$$

$$\lambda_R = \frac{V_R}{f} \quad (3-8)$$

Pour déterminer la variation de la vitesse sous un point situé à la surface, les deux récepteurs sont disposés sur la surface tel que le point examiné soit au milieu de la ligne joignant les deux récepteurs.

3.2.2. La source d'énergie

La source a une fonction essentielle : celle de générer, par le biais d'un impact à la surface du milieu, les ondes enregistrées sous forme de signaux. Le choix de la source est très important car suivant le type de source, on peut émettre une certaine bande de fréquence. Par exemple, plus la source est volumineuse, plus le temps de contact avec le matériau sera grand et plus les fréquences générées seront basses (Hiltunen et Woods, 1990). D'autre part, plus la masse de la source est petite, moins on produira d'énergie. Il faut donc trouver un compromis pour limiter la taille de la source afin de générer des hautes fréquences ou une bande de fréquence préférentielle, tout en restant dans les limites acceptables de sensibilité des récepteurs au niveau énergétique. Cependant, selon la rigidité locale du matériau, une source ne génère pas toujours les mêmes fréquences sur tous les sites. Une source doit aussi répondre au critère de l'utilisation facile (pratique) et ne pas endommager le matériau. Le marteau est une source très utilisée sur le béton mais il existe d'autres types de sources, dont la bille d'acier et les sources piézo-électriques. Il est préférable d'essayer plusieurs sources sur le site d'essai avant de sélectionner la source d'impact.

3.2.3. Les récepteurs

Lors d'un essai d'analyse spectrale des ondes de surface, le mouvement des particules à la surface du milieu est enregistré. La détection de l'onde élastique et sa conversion en un signal

électrique sont assurées par un capteur sensible au mouvement vertical, le plus souvent de type piézo-électrique. Le capteur constitue l'élément clé des méthodes acoustiques [Roget, 1988]. Pour les applications, il faut prendre en compte les caractéristiques propres du capteur et s'assurer qu'il convient aux conditions d'essais. Le couplage capteur-matériau est également important. Il assure la transmission des ondes acoustiques entre le matériau et le capteur. Il existe des couplages fluides avec pression de maintien (eau, huile, graisse) et des couplages solides (colle). Lors des essais d'ASOS, la colle est souvent utilisée pour le couplage. Un capteur doit également être très sensible, ne pas vieillir pour garantir la fidélité et la répétition des mesures et surtout ne pas altérer les caractéristiques de l'onde. Les capteurs ont la particularité d'avoir une réponse linéaire sur une bande de fréquence avant d'augmenter fortement pour atteindre un maximum à la fréquence de résonance. Souvent, les utilisateurs de ces capteurs se limitent à considérer la bande de fréquence correspondant à la réponse linéaire. Cependant, Sheu (1987) montre, dans son étude sur l'application et les limites de l'ASOS, que la fréquence de résonance a peu d'influence sur les résultats de la méthode lorsque les deux capteurs sont identiques.

Les capteurs utilisés pour l'ASOS sont de deux types : les géophones et les accéléromètres. Les géophones mesurent la vitesse de la particule alors que les accéléromètres enregistrent l'accélération de la particule. Le mouvement des particules dans le béton atteint des fréquences plus élevées que dans le sol. Pour cette raison, il est préférable d'utiliser des accéléromètres.

3.2.4. Acquisition et traitement des données

L'enregistrement des signaux par les deux récepteurs débute dès que le premier récepteur détecte un mouvement de particules dont l'énergie est supérieure à un seuil défini par l'opérateur. Le premier récepteur est appelé « *déclencheur* ». Ce seuil d'énergie doit être supérieur à celui de l'énergie générée par le bruit ambiant afin de s'assurer de détecter des ondes de Rayleigh. Il est également préférable d'enregistrer plusieurs signaux (Nazarian, 1984), pour chacun des récepteurs, et de faire une moyenne de ces signaux dans le domaine des temps ou des fréquences. Le but de cette opération est d'augmenter le rapport signal sur bruit des signaux. Suite à de nombreux essais d'ASOS effectués sur des sols, Heisey (1981)

recommande de considérer une moyenne sur 5 signaux pour chacun des récepteurs. Les signaux obtenus après l'opération de la moyenne seront utilisés pour le traitement. Les signaux peuvent être traités avec un analyseur spectral (Figure 3.9) afin d'obtenir les spectres de phase et d'amplitude entre les deux signaux et la fonction de cohérence γ^2 . La vitesse moyenne de propagation des ondes de Rayleigh entre les deux récepteurs est calculée à partir du spectre de phase. La fonction de cohérence permet d'évaluer la qualité des résultats. Cette fonction est définie par la relation suivante :

$$\gamma^2 = \frac{G_{XY} \cdot G_{XY}^*}{G_{XX} \cdot G_{YY}} \quad (3-9)$$

où G_{xx} est l'autospectre (auto spectrum en anglais).

Un exemple de fonction de cohérence et de spectre de phase sont donnés sur les figures 3.10 et 3.11. Il est favorable et généralement nécessaire d'avoir des valeurs élevées (proche de 1) dans la fonction de cohérence sur une large bande de fréquence. Les faibles valeurs (inférieures à 0.9) de cette fonction impliquent que les signaux contiennent du bruit pour les fréquences concernées et ne peuvent pas être utilisés dans la construction de la courbe de dispersion.

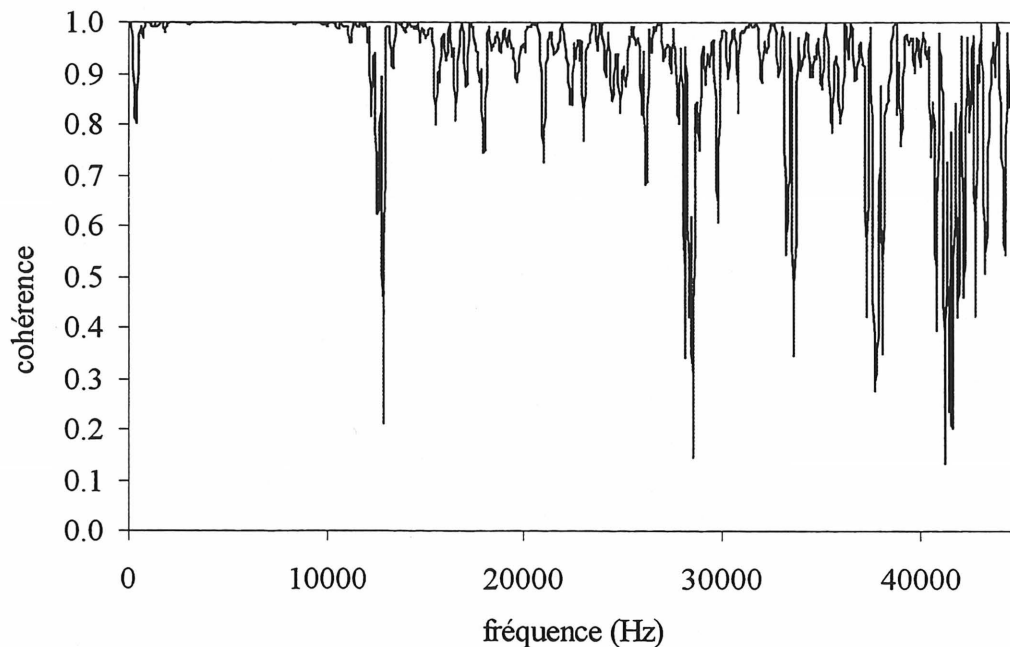


Figure 3.10 Exemple de fonction de cohérence

Le spectre de phase obtenu avec l'analyseur spectral est sous une forme «non déroulée» parce que les valeurs des phases sont comprises entre $+\pi$ et $-\pi$ (Figure 3.11). Il est nécessaire de « dérouler » ce spectre pour pouvoir calculer les vitesses de propagation des ondes. Pour dérouler le spectre, il faut ajouter -2π à tous les sauts de phase (cycle) dans le sens croissant des fréquences. Pour l'exemple cité, le spectre de phase «déroulé» obtenu est donné sur la figure 3.11. La phase obtenue a un signe négatif car chacune des ondes de fréquence f atteint la position du récepteur 2 avec un retard de phase par rapport à la position du récepteur 1. Il suffit de ne pas considérer le signe négatif pour obtenir des vitesses positives.

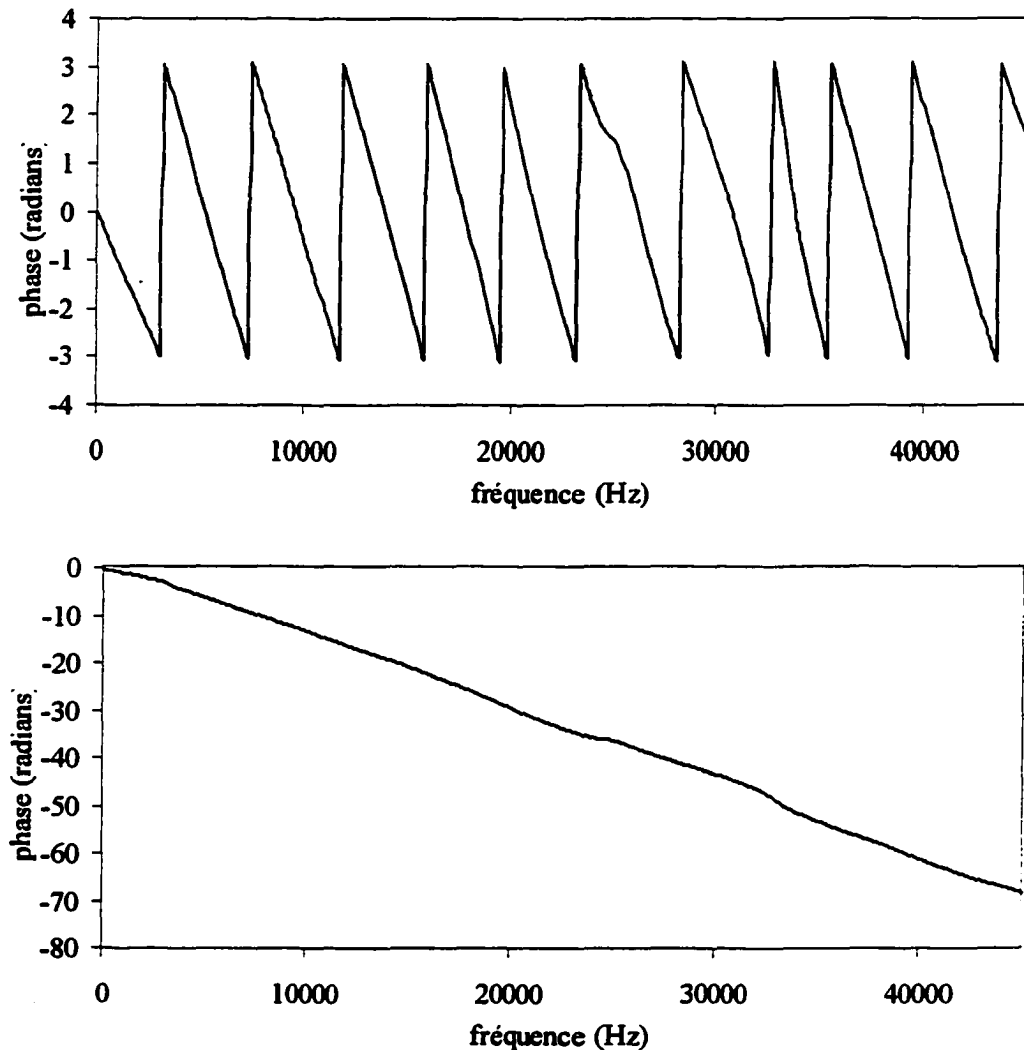


Figure 3.11 Exemple de spectres de phase «non déroulé» et «déroulé»

La courbe de dispersion (figure 3.12) est construite à partir des vitesses obtenues et des longueurs d'onde correspondantes. Il est également possible d'établir une courbe de dispersion en fonction de la fréquence. Cependant, il est préférable d'utiliser les longueurs d'ondes qui sont plus significatives puisqu'elles sont directement liées à la profondeur. Les hautes fréquences correspondront aux faibles longueurs d'ondes alors que les basses fréquences donneront plutôt de grandes longueurs d'ondes. Par contre, il est toujours préférable d'obtenir un spectre de phase de qualité sur une large bande de fréquence afin de considérer un maximum de longueur d'onde, ce qui est souvent difficile à réaliser compte tenu des bandes fréquentielles limitées obtenues à la suite des essais. Pour y remédier, une source pouvant générer un maximum de hautes fréquences sera utilisée lorsque l'on désire caractériser le matériau (chaussées, béton) sur de faibles profondeurs (faibles longueurs d'ondes). Dans le cas des sols, les caractéristiques varient pour de grandes profondeurs. Il est alors préférable d'obtenir de grandes longueurs d'ondes et donc d'utiliser de basses fréquences.

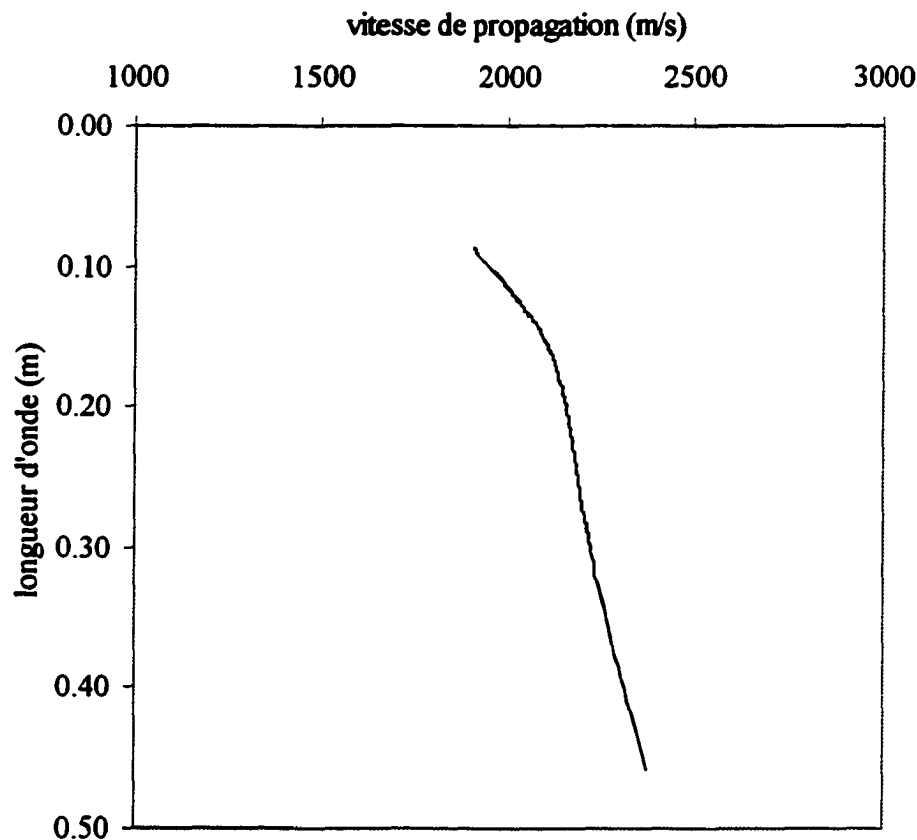


Figure 3.12 Exemple de courbe de dispersion

3.3. Synthèse des travaux de la littérature

3.3.1. Les applications de la technique sur les sols et les chaussées

Durant de nombreuses années, les applications de la méthode d'analyse spectrale des ondes de surface dans le domaine du génie civil n'ont concerné que les sols et les chaussées. Nazarian (1984) a fait une application de la méthode sur un barrage en béton. Par la suite d'autres travaux [Sheu, 1987; Kalinski et col., 1992] ont été réalisées sur des structures en béton. La méthode est très sensible au type de milieu de propagation et il est important de différencier les applications suivant le milieu.

La procédure établie par les recherches effectuées sur les sols et les chaussées est décrite ci-dessous. L'arrangement source/récepteur utilisé est la géométrie « *Common Receivers MidPoint* » (CRMP) [Nazarian et coll., 1983]. Cette configuration de mesure est représentée sur la figure 3.13. Les deux récepteurs et la source sont colinéaires et la distance SR , séparant la source et le premier récepteur, est égale à la distance RR entre les deux récepteurs [Heisey, 1981]. Heisey a également étudié les effets de l'espacement entre les récepteurs lors de nombreux essais sur des sols. Les conclusions de ces recherches ont abouti à un critère de sélection des longueurs d'onde, en fonction de l'espacement RR . Les longueurs d'onde qui ne satisfont pas la relation $0,5.RR < \lambda < 3.RR$ ne sont pas considérées pour la construction de la courbe de dispersion. Ce critère a pour conséquence d'éliminer les faibles longueurs d'onde ($\lambda < 0,5.RR$) dont l'amplitude est fortement atténuée sur la distance $SR=RR$, et par conséquent dominées par le bruit ambiant. Les grandes longueurs d'onde ($>3.RR$) sont également éliminées parce qu'elles ne se sont pas entièrement développées lorsqu'elles atteignent le premier récepteur. D'autres part, elles sont fortement contaminées par les ondes de volume qui n'ont pas eu le temps de s'en dissocier. Pour respecter ce critère, il est nécessaire de considérer plusieurs espacement RR afin d'obtenir un large intervalle de longueurs d'onde, d'où l'objectif de la géométrie *CRMP*.

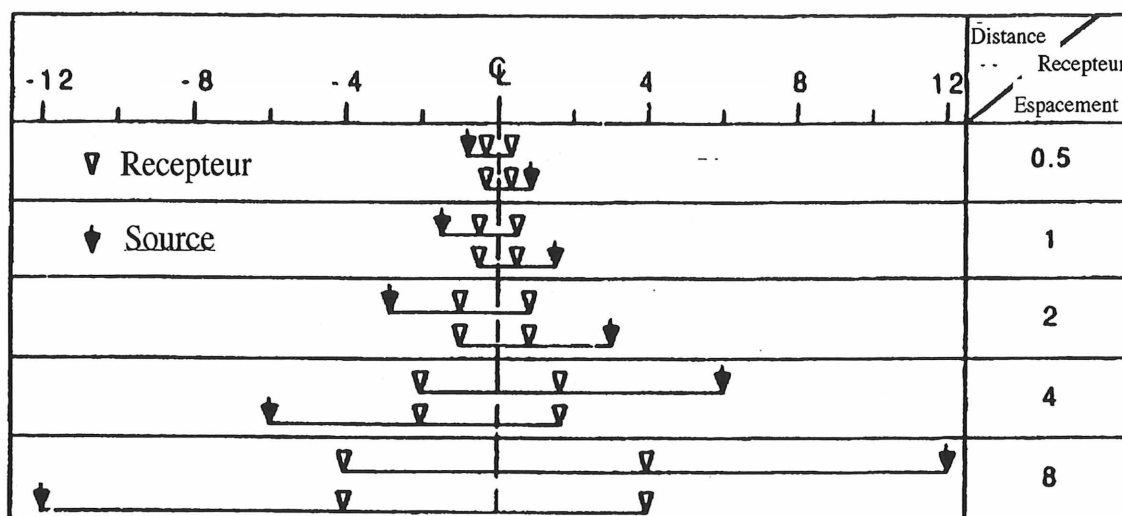


Figure 3.13 Exemples de positions de la source, par rapport aux récepteurs, avec la configuration CRMP [Nazarian et col., 1983]

Dans la configuration CRMP, les deux récepteurs sont déplacés, après chacune des mesures, par rapport à un point imaginaire situé au centre de la ligne joignant les deux récepteurs (Figure 3.13). La source est également déplacée de sorte que la distance entre la source et le premier récepteur soit toujours égale à la distance entre les deux récepteurs. Par ailleurs, la position de la source est inversée, pour tous les espacements RR , afin que l'onde se propage dans le sens inverse. Le but de cette opération est de détecter l'inclinaison ou l'hétérogénéité des couches d'un site en comparant les deux courbes de dispersion. Lorsque les différentes couches qui composent le milieu ne sont pas horizontales, la moyenne des deux courbes de dispersion peut être considérée comme la moyenne des propriétés de couches horizontales équivalentes. Ainsi, deux courbes de dispersion sont obtenues, selon la position de la source, pour l'ensemble des positions des récepteurs, soient les courbes de dispersion *directe* et *inverse*.

3.3.1.1. Les critères de sélection des longueurs d'ondes

La procédure utilisée sur les sols pour obtenir les courbes de dispersion a peu évolué depuis les travaux de Heisey (1982) et Nazarian (1984). Par contre, d'autres études ont recommandé certaines modifications du critère de sélection des longueurs d'ondes. Suite à plusieurs expériences sur différentes chaussées, Hiltunen et Woods (1990) ont montré que la condition d'influence des ondes de volume est faible pour des longueurs d'ondes inférieures à $2.RR$ et non à

3.RR. Sanchez-Salinero et coll. (1987) ont suggéré, en se basant sur une étude théorique sur des milieux très diverses (homogènes et multicouches), que seules les longueurs d'ondes inférieures à $0,5\lambda_R$ peuvent être considérées lors de la construction de la courbe de dispersion. La conclusion d'une autre étude [Hunaidi, 1993], basée sur des simulations par ordinateur sur des chaussées, rejoint également le critère de Sanchez-Salinero. Il y a donc contradiction en ce qui concerne les critères de sélection des longueurs d'ondes. Ceci peut s'expliquer par le fait que les études ont été réalisées sur plusieurs sites avec des différences considérables au niveau des propriétés. Il semble qu'un seul critère ne peut pas être établi pour tous les sites. Il est donc important d'élaborer un critère propre au matériau et notamment pour le matériau béton.

3.3.1.2. Profondeur de pénétration des ondes de Rayleigh

Pour interpréter adéquatement les courbes de dispersion obtenues, il faut établir une relation entre la profondeur de pénétration de l'onde et sa longueur d'onde correspondante. Ceci a suscité de nombreuses recherches qui ont abouti à des réponses souvent très différentes. Certains auteurs estiment cette profondeur comme équivalente à une demi longueur d'onde [Heukelon et col., 1960], d'autres à un tiers de la longueur d'onde [Heisey, 1981] ou même à une longueur d'onde [Ballard, 1964]. La documentation ne fait donc pas l'unanimité sur l'ordre de grandeur de cette profondeur. D'autre part, il est difficile d'adopter un même critère pour des matériaux dont les propriétés s'améliorent nettement avec la profondeur (sol, chaussée) et pour des matériaux plus homogènes (béton). Notamment, le béton est un matériau qui présente souvent des signes de vieillissement à la surface, mais la transition entre le mauvais béton et le béton sain est très progressive. Ce sujet sera abordé au cours de ce chapitre, et l'un des objectifs de cette étude est d'établir un critère pour le cas où le milieu de propagation est le béton.

3.3.1.3. Influence des modes de propagation des ondes de Rayleigh

Un problème largement rapporté par la littérature est celui relatif au mode de propagation des ondes de Rayleigh. Ce problème se manifeste, sur le spectre de phase, par des changements brusques (distorsion) dans le spectre qui ne correspondent pas à des sauts de phases réguliers [Hunaidi, 1993]. Ceci est observé sur la courbe de dispersion lorsque plusieurs vitesses correspondent à une même longueur d'onde. Cela signifie que, pour une même longueur d'onde, l'onde de Rayleigh se propage à différentes vitesses. Cet effet de mode survient généralement

lorsque les couches qui composent le milieu ont un fort contraste de propriétés et que ces propriétés ne s'améliorent pas progressivement avec la profondeur. Ce cas se rapproche de celui des sols et des chaussées mais pas du béton.

3.3.2. Les applications de la technique sur des structures en béton

Les différentes applications sur le béton rapportées par la littérature font appel à la même procédure que celle établie pour les chaussées et les sols. Cependant, le béton est un milieu où les ondes de Rayleigh se propagent plus rapidement, entre 1500 m/s et 2500 m/s, selon les propriétés du béton. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser des sources qui génèrent des fréquences élevées pour obtenir de faibles longueurs d'ondes et déterminer les propriétés du béton proche de la surface. Par exemple, dans le cas d'un béton dont la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh est de 2000 m/s, la source devra générer des basses fréquences de l'ordre de 2 KHz et des hautes fréquences jusqu'à 100 KHz. Ces fréquences sont nécessaires pour construire une courbe de dispersion contenant des longueurs d'onde comprises entre 0,05 m et 1 m. Pour comparaison, la bande de fréquence utilisée sur les sols est comprise entre 10 Hz et 800 Hz. De ce fait, l'étude d'une structure en béton sera différente de celle d'un sol. Les sources doivent être différentes, et les récepteurs également, afin de mieux générer et enregistrer les hautes fréquences. D'autres part, de nombreux critères, tel celui concernant la sélection des longueurs d'ondes et la distance SR égale à la distance RR , ont été déterminés lors de travaux effectués sur des sols et des chaussées. La pertinence de ces critères restrictifs dans le cas du béton reste à démontrer.

Les quelques applications de la technique sur des structures en béton rapportées par la littérature concernent essentiellement des essais en laboratoire ou des simulations sur ordinateur. Certaines études [Bay et col., 1991; Sheu, 1987; Krstulovic-Opara et col., 1996] ont été réalisées durant la cure du béton. Bay et Stokoe (1991) ont effectué des essais d'ASOS sur un béton à jeune âge pour évaluer la sensibilité de la vitesse des ondes de Rayleigh vis à vis de l'augmentation de la résistance. Afin de valider les résultats, des essais de compression et de mesure du module d'élasticité statique ont été réalisés ainsi que des mesures de vitesses de propagation des ondes de compression à travers le béton. Dans un premier temps, la technique s'est avérée capable d'estimer le module de rigidité d'un béton à partir de la surface du béton. La technique a également été capable de suivre le durcissement du béton durant les premiers jours de cure et les

jours suivants. Les essais ont été effectués sur des dalles en béton (4 m x 1,8 m x 0,3 m) considérées homogènes et isotropes. Une seule qualité de béton a été utilisée pour la fabrication de ces dalles. Seules les longueurs d'ondes inférieures à l'épaisseur de la dalle ont été considérées. Par contre, aucune étude n'a été réalisée sur l'aptitude de l'ASOS à identifier différentes qualités de béton. D'autre part, la littérature ne rapporte aucune référence sur l'étude de la variation de la qualité du béton avec la profondeur.

3.3.2.1. Effets des réflexions sur les résultats

Une autre caractéristique d'un matériau rigide comme le béton est que les ondes hautes fréquences qui s'y propagent s'atténuent moins rapidement que dans les sols, notamment les ondes de volume. Dans un sol ou une chaussée, l'atténuation des ondes de volume est très importante et les frontières sont assez éloignées pour simuler un milieu semi infini. Quant aux éléments en béton (dalle, poutre, etc), ils ne sont pas assez grands pour être considérés comme des milieux semi infinis. La majorité de l'énergie, enregistrée lors d'un essai d'ASOS sur une structure en béton, provient des ondes de Rayleigh. Cependant, les ondes de volume directes et les réflexions de ces mêmes ondes de volume et des ondes de Rayleigh sur les frontières de l'élément contribuent de manière significative aux ondes détectées par les récepteurs. Le principe de l'ASOS étant basé sur l'enregistrement et l'analyse des mouvements de particules associés aux ondes de Rayleigh, il est nécessaire d'éliminer la part des réflexions dans les signaux pour que l'énergie des ondes de Rayleigh soit dominante.

Une des techniques utilisées pour atténuer les réflexions, est la multiplication des signaux par une *fonction fenêtre*, $f(t)$, en fonction du temps. La littérature [Bay et Stokoe, 1991; Kalinski, 1994] rapporte que la fenêtre exponentielle $f(t)=e^{-t/\tau}$, où t est le temps et τ un facteur contrôlant la pente de décroissance de la fonction, est appropriée pour atténuer les réflexions. Pour cela, il faut supposer que la première arrivée d'énergie est celle des ondes de Rayleigh. Cette fonction a pour effet d'augmenter l'énergie directe des ondes de Rayleigh relativement à celle des réflexions, tel que le montre la figure 3.14. L'amplitude correspondant au temps zéro est multipliée par 1. Lorsque le temps augmente, la fonction exponentielle réduit l'amplitude du signal et tend à annuler l'amplitude à la fin du signal. Par contre, cette fenêtre n'atténue pas les ondes de volume directes. D'autre part, elle ne tient pas compte du temps d'arrivée de l'énergie des ondes de

Rayleigh dans le signal. Il suffit que le décalage, entre le début du signal et l'arrivée de l'énergie des ondes de Rayleigh, soit trop important pour que la *fonction fenêtre* élimine cette énergie et modifie les résultats. Cette situation peut correspondre au cas où le deuxième récepteur est très éloigné du premier récepteur.

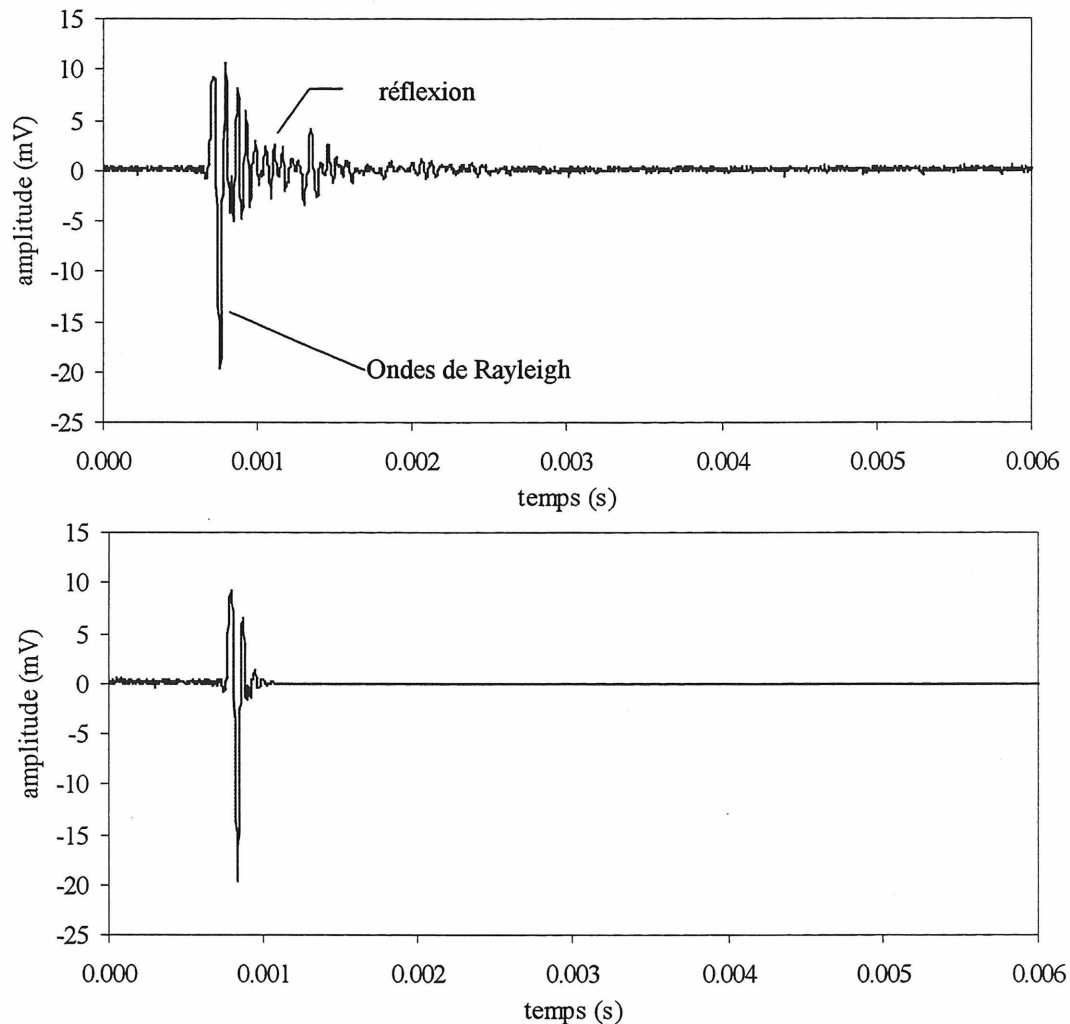


Figure 3.14 Effets de la fenêtre exponentielle sur les réflexions

L'utilisation de la *fonction fenêtre* est très importante pour des applications de l'ASOS sur le béton, mais une mauvaise utilisation de la fonction peut avoir des effets négatifs. Le fait que les ondes de volume directes ne soient pas considérées dans la procédure peut également représenter une incertitude majeure dans l'analyse des résultats. Faut-il alors modifier la procédure de sorte à

éliminer ces ondes de volume directes ? Peut-on utiliser d'autres *fonctions fenêtres* pour éliminer les réflexions ainsi que les ondes de volume directes, sans atténuer l'énergie des ondes de Rayleigh ? Ces aspects seront abordés dans le chapitre 5 consacré à la présentation et à l'analyse des résultats.

Il est également possible d'utiliser l'arrangement CRMP et les positions *directe* et *inverse* de la source pour atténuer les réflexions. Les signaux utilisés pour calculer le spectre de phase sont obtenus en faisant la moyenne des signaux enregistrés, pour les positions *directe* et *inverse* de la source. Cependant ce procédé est assez long et n'élimine pas totalement les réflexions. Un autre moyen d'atténuer ou de limiter les réflexions est d'utiliser la source et les récepteurs loin des frontières de la structure, ce qui n'est pas toujours possible. Sheu (1987) a effectué une étude sur les effets des réflexions. Les conclusions de l'étude suggèrent que les ondes de volume directes ont un effet secondaire comparativement à celui des réflexions. Pour diminuer l'effet de ces réflexions, il recommande certaines dispositions de la source et des récepteurs par rapport aux frontières de la structure. Par exemple, lorsque la ligne d'essai est parallèle à une frontière, il est préférable de considérer une distance $k.RR$ (RR étant la distance entre récepteurs) séparant la ligne d'essai de la limite de la structure de sorte à ce que le coefficient k doit satisfaire :

$$k \geq 3 \text{ ou } k \leq 0,2 \quad (3-10)$$

Ces restrictions peuvent être appliquées assez facilement lors de l'utilisation de la technique en laboratoire. Par contre, il est très difficile de les respecter pour des applications en chantier à cause des limitations qu'elles engendrent. Il est donc indispensable de développer une procédure capable d'estimer la qualité du béton en laboratoire et sur chantier. Cette procédure doit être efficace sur le béton, très rapide d'utilisation et non contraignante. Toutefois, il est plus aisé de développer cette procédure en laboratoire avant de l'appliquer en chantier. D'autres part, peu d'études [Nazarian, 1984; Kalinski et col., 1992; Kalinski, 1994] ont été réalisées sur des structures en service. Aucune d'entre elles n'a été validée par des résultats d'essais mécaniques.

3.3.2.2. Étude des défauts présents dans le matériau

Le béton est un matériau qui contient de nombreux défauts sous forme de fissures ou de microfissures. Ces défauts peuvent avoir une influence sur la courbe de dispersion. En effet,

lorsque la vitesse diminue avec la profondeur, cela ne signifie pas forcément que la qualité du béton diminue. La présence d'une fissure dans le béton peut altérer la vitesse, même si le béton sain a toujours la même qualité. La présence de micro fissures peut également diminuer la qualité du béton et par conséquent la vitesse de propagation. Une étude réalisée par Kalinski (1994) a montré que l'ASOS était capable d'identifier des dommages causés par des fissures et des microfissures. Les essais ont été réalisés sur des poteaux et des poutres soumis à différents chargements cycliques. Néanmoins, l'aptitude de la technique à détecter les fissures est variable selon leur orientations et leur positions.

Hevin (1998) a également réalisé une étude, par simulation sur ordinateur, pour caractériser les fissures de surface et déterminer leur profondeur. Cette étude ne fait pas appel à la technique d'ASOS. Toutefois, elle utilise les caractéristiques des ondes de Rayleigh. Des essais expérimentaux ont également été effectués afin d'appuyer les résultats numériques. D'autres études [Gucunski et col., 1996; Ganji et col., 1997], également basées sur la simulation numérique, ont été réalisées sur des structures en béton contenant des discontinuités. Gucunski a considéré plusieurs positions et orientations des discontinuités à l'intérieur du milieu. Cette étude a montré que les réflexions provenant des discontinuités provoquent des fluctuations dans la courbe de dispersion. L'importance de ces fluctuations est variable selon la fréquence, l'espacement des récepteurs, les dimensions de la discontinuité et sa position dans la structure. L'ASOS est sensible à la présence de défauts dans le béton. Néanmoins l'interaction des ondes de Rayleigh avec différents types de discontinuités est encore mal défini. Il faudrait apporter des éléments pour une meilleure connaissance des phénomènes de propagation de ces ondes.

3.4. Conclusion

La technique d'ASOS a été développée et appliquée sur des sols et des chaussées dans le but d'établir les profils de rigidité de ces sites. Au début des années 90, quelques applications ont été effectuées sur des structures en béton, en utilisant la même procédure que celle établie sur les sols. Par contre, la méthode a dû être modifiée pour prendre en compte la présence des réflexions très importantes dans le béton. Les sources et les récepteurs ont également été adaptés au matériau. L'application de la technique a montré de nombreuses possibilités pour l'auscultation des structures en béton, tel que le suivi de l'estimation de la qualité du béton, l'augmentation de la résistance du béton au jeune âge et la détection des fissures de surface. Néanmoins, une

procédure doit être développée pour prendre en considération les caractéristiques du béton et accroître les performances de la technique d'ASOS. D'autre part, des investigations en chantier doivent être réalisées afin d'évaluer l'aptitude de la technique à estimer la qualité et à suivre la variation de la qualité du béton avec la profondeur.

CHAPITRE 4

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

4.1. Introduction

Les différents aspects de l'analyse spectrale des ondes de surface ont été présentés dans le chapitre précédent. La technique a été développée pour caractériser les sols et les chaussées, néanmoins son utilisation sur le béton reste encore limitée. Afin d'améliorer les connaissances existantes sur l'application de la technique sur le béton et de répondre à l'un des objectifs de ce travail, qui est l'étude de la sensibilité de l'ASOS aux variations de la qualité du béton, un programme expérimental en laboratoire a été établi en quatre étapes. Dans une première partie, des essais ont été réalisés pour étudier l'aptitude de la technique à distinguer trois qualités distinctes de béton. La deuxième partie concerne les possibilités de la technique à rendre compte de l'amélioration des propriétés du béton en fonction de la profondeur. L'étape suivante a été consacrée à l'étude et à l'optimisation des différents paramètres d'essais. Quant à la dernière étape de l'étude expérimentale, elle a trait aux effets des discontinuités sur les résultats afin d'évaluer les aptitudes offertes par la technique pour les détecter et les caractériser.

Ce chapitre présente les différents modèles expérimentaux utilisés pour les essais en laboratoire. Des informations sont également données sur les équipements et les logiciels utilisés pour l'acquisition et le traitement des données, nécessaires à l'application de l'ASOS. D'autre part, des essais soniques ont également été réalisés sur les blocs afin de les corrélérer avec ceux résultant de l'ASOS. Les détails de ces essais sont donnés dans ce même chapitre.

4.2. Les modèles expérimentaux

Trois phases sont décrites dans cette section. Les deux premières sont consacrées à la description des mélanges de bétons et des modèles fabriqués pour l'étude de la qualité du béton. La troisième phase concerne les modèles expérimentaux utilisés pour l'étude de l'influence des discontinuités.

4.2.1. Les blocs homogènes

Les différentes études rapportées par la littérature ont souvent fait appel à un seul mélange de béton. Aucune recherche n'a été réalisée sur la sensibilité de la technique aux variations de la qualité de béton. Dans le but d'étudier l'aptitude de la méthode à distinguer différentes qualités de béton et d'associer une vitesse de propagation des ondes de Rayleigh à une qualité donnée, trois mélanges de béton ont été fabriqués pour la construction des modèles expérimentaux. Les vitesses des ondes de Rayleigh mesurées ont été utilisées pour déterminer les propriétés mécaniques dynamiques du béton.

Les trois modèles expérimentaux (Figure 4.1) sont de dimensions 1,4 m x 1,0 m x 0,5 m et ne comportent aucune armature. Il est important d'avoir des modèles d'assez grandes dimensions afin de diminuer l'influence des réflexions sur les résultats. Pour la suite de ce manuscrit, ces modèles seront désignés par *bloc homogène 1, 2 et 3* en référence au mélange utilisé.

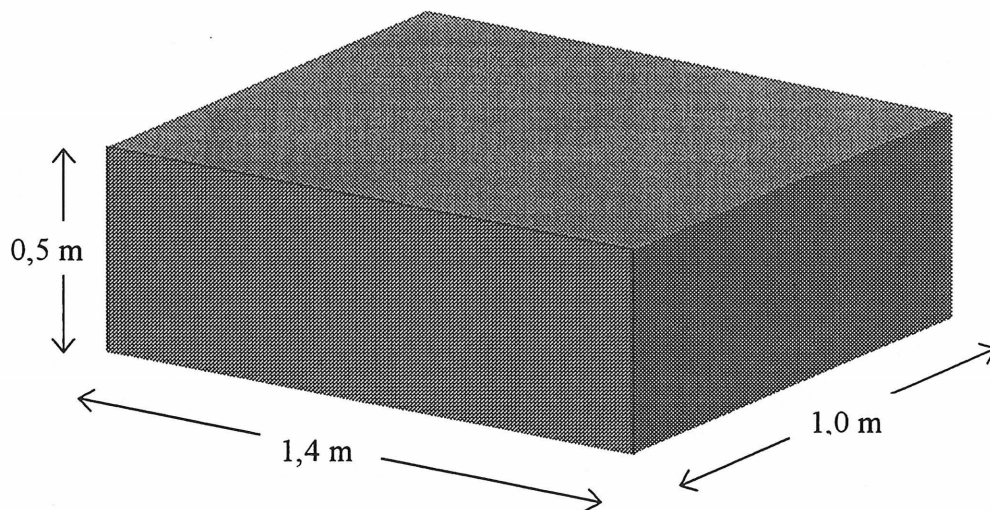


Figure 4.1 Caractéristiques des blocs homogènes

Les formulations des mélanges ont été faites afin d'obtenir un béton de mauvaise qualité (mélange 1), un béton de qualité moyenne (mélange 2) et un béton à haute performance (mélange 3). La qualité du béton a été établie relativement au module d'élasticité, en essayant d'obtenir un contraste du module d'élasticité d'environ 10 GPa entre les différents bétons.

La fabrication des modèles expérimentaux a été précédée par l'optimisation des mélanges. Pour cela, plusieurs formulations de béton ont été considérées et des essais en laboratoire ont été effectués afin de déterminer les formulations qui permettent d'atteindre les objectifs de l'étude. Concernant le mélange 1, la formulation sélectionnée a été celle qui a donné la résistance et le module d'élasticité les plus faibles. Quant aux deux autres mélanges, ils ont été optimisés en modifiant certaines caractéristiques, notamment en diminuant le rapport eau sur ciment (E/C) et en ajoutant de la fumée de silice pour le mélange 3.

Les modèles expérimentaux ont été fabriqués lors d'une seule journée. Les caractéristiques des trois mélanges de béton à l'état frais sont données dans l'annexe 1. Des échantillons des trois mélanges ont été prélevés dans des cylindres afin d'effectuer des essais mécaniques à 28 jours. Le tableau 4.1 résume les propriétés mécaniques des bétons confectionnés. Les essais de résistance à la compression et de mesures des modules d'élasticité et des coefficients de Poisson ont été effectués conformément à la norme ASTM C39-94 [Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens] et à la norme ASTM C469 [Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression]. Quant aux densités spécifiques des bétons, elles ont été déterminées en se référant à la norme ASTM C642 [Test Method for Specific Gravity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete].

Tableau 4.1 Caractéristiques mécaniques à 28 jours des mélanges utilisés

	Mélange 1	Mélange 2	Mélange 3
Eau/Ciment	0,80	0,65	0,40
Densité	2,13	2,25	2,33
Résistance à la compression (MPa) ou f'	17	28	53
Module d'élasticité statique (GPa) ou E_s	24	30	36
Coefficient de poisson ou ν	0,20	0,22	0,24

Le mélange 1 a le plus grand rapport eau/ciment (0,8) et les plus faibles propriétés mécaniques ($E_s=24$ GPa, $f'=17,5$ MPa). Le mélange 3 a les propriétés mécaniques les plus élevées ($E_s=36$ GPa, $f'=53$ MPa), alors que le mélange 2 a des propriétés mécaniques ($E_s=30$ GPa, $f'=27$ MPa)

comprises entre celles des mélanges 1 et 3. Le contraste des modules est de 6 GPa pour les mélanges 1 et 2 ainsi que pour les mélanges 2 et 3.

4.2.2. Le bloc multicouche

Un quatrième modèle expérimental a été construit pour simuler la variation de la qualité en profondeur. L'objectif est d'évaluer les aptitudes de la technique à rendre compte de l'amélioration des propriétés du béton en fonction de la profondeur. Ce modèle a permis d'étudier la capacité de la technique à estimer la profondeur de ces couches ainsi que la profondeur des propriétés qui influencent la propagation des ondes de Rayleigh.

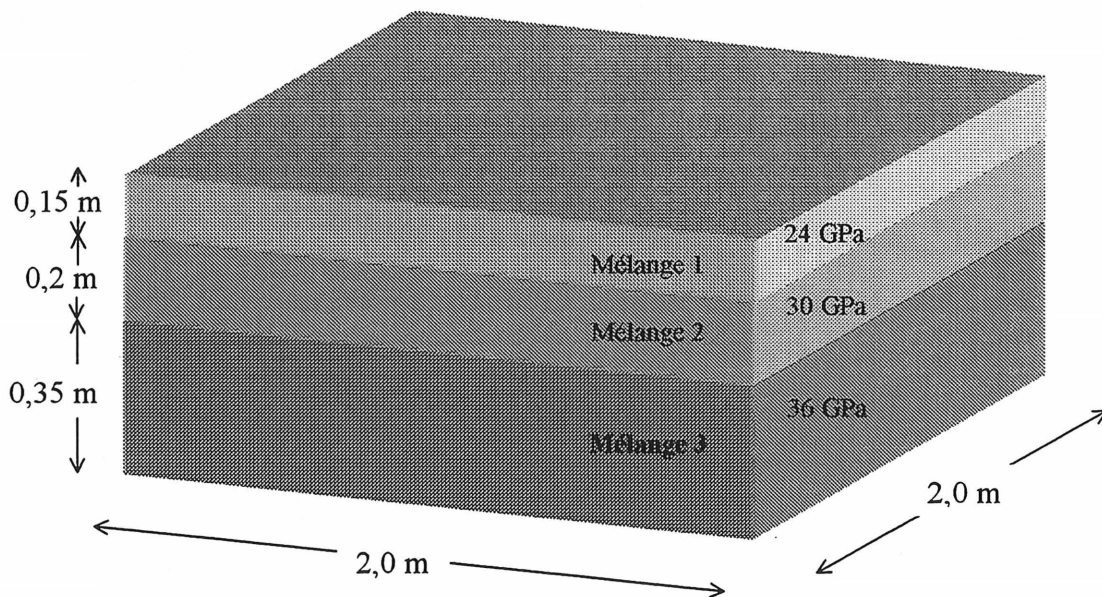


Figure 4.2 Bloc multicouche

Un bloc de dimensions 2,0 m x 2,0 m x 0,7 m a été fabriqué en utilisant les trois mélanges. Ce bloc (Figure 4.2) est composé d'une couche de base de mélange 3, une couche intermédiaire de mélange 2 et une couche superficielle de mélange 1. L'épaisseur des couches de base, intermédiaire et de surface sont respectivement de 0,35 m, 0,2 m et 0,15 m. Les caractéristiques de ce modèle sont intéressantes pour approcher un cas de chantier où la structure en béton est endommagée à la surface et où la dégradation diminue graduellement avec la profondeur.

4.2.3. Les discontinuités

Dans le bloc multicouche, des discontinuités ont été disposées avant la mise en place du béton. Les discontinuités ont été mises près des frontières du modèle, à environ 0,25 m de celles-ci, afin de ne pas interférer avec les essais de caractérisation des couches de béton. Le but de cette opération est d'évaluer la capacité de la technique à les détecter et d'étudier l'influence de l'orientation et de la position des discontinuités sur les résultats. Pour atteindre ces objectifs, deux types de discontinuités ont été introduits : des discontinuités verticales et des discontinuités horizontales.

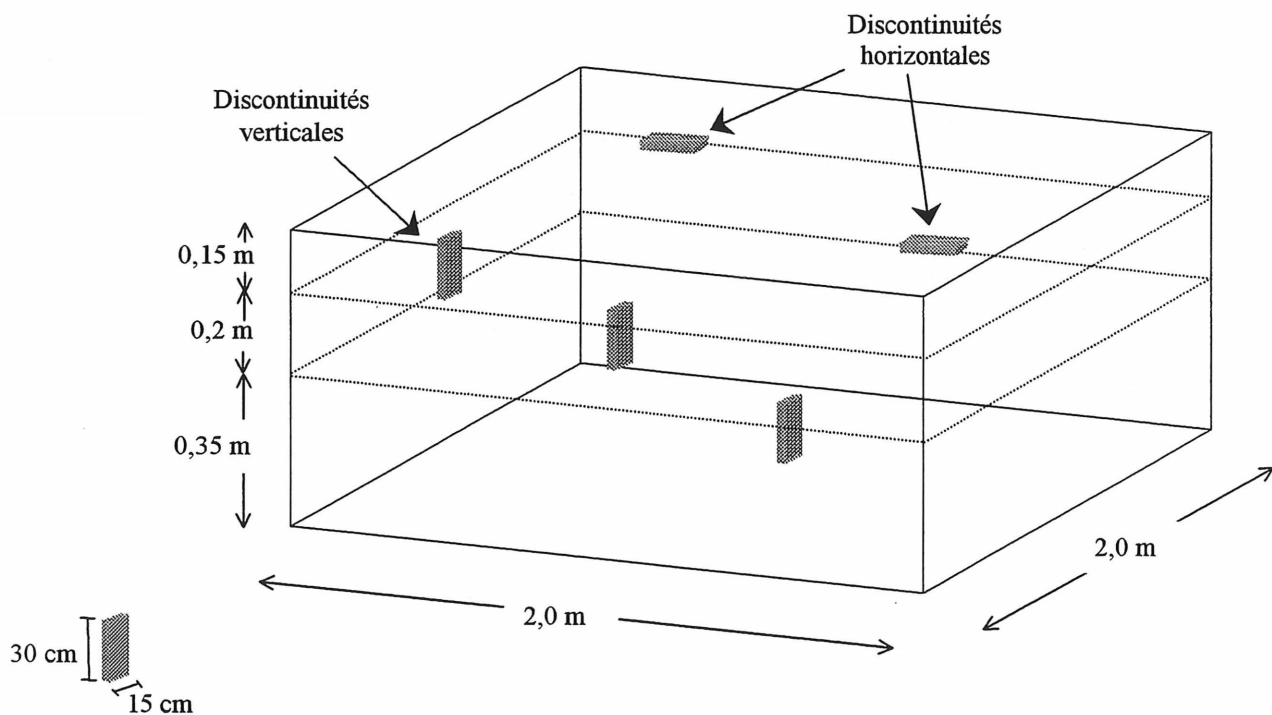


Figure 4.3 Les différentes discontinuités introduites dans le bloc

De manière générale, ces discontinuités simulent une désagrégation ou une fissuration du béton. Relativement à un cas réel, les discontinuités horizontales peuvent par exemple représenter un délaminage ou une décohésion importante entre un béton de réparation et un béton original. Quant aux discontinuités verticales, elles simulent essentiellement des fissures verticales qui peuvent déboucher ou non à la surface du béton.

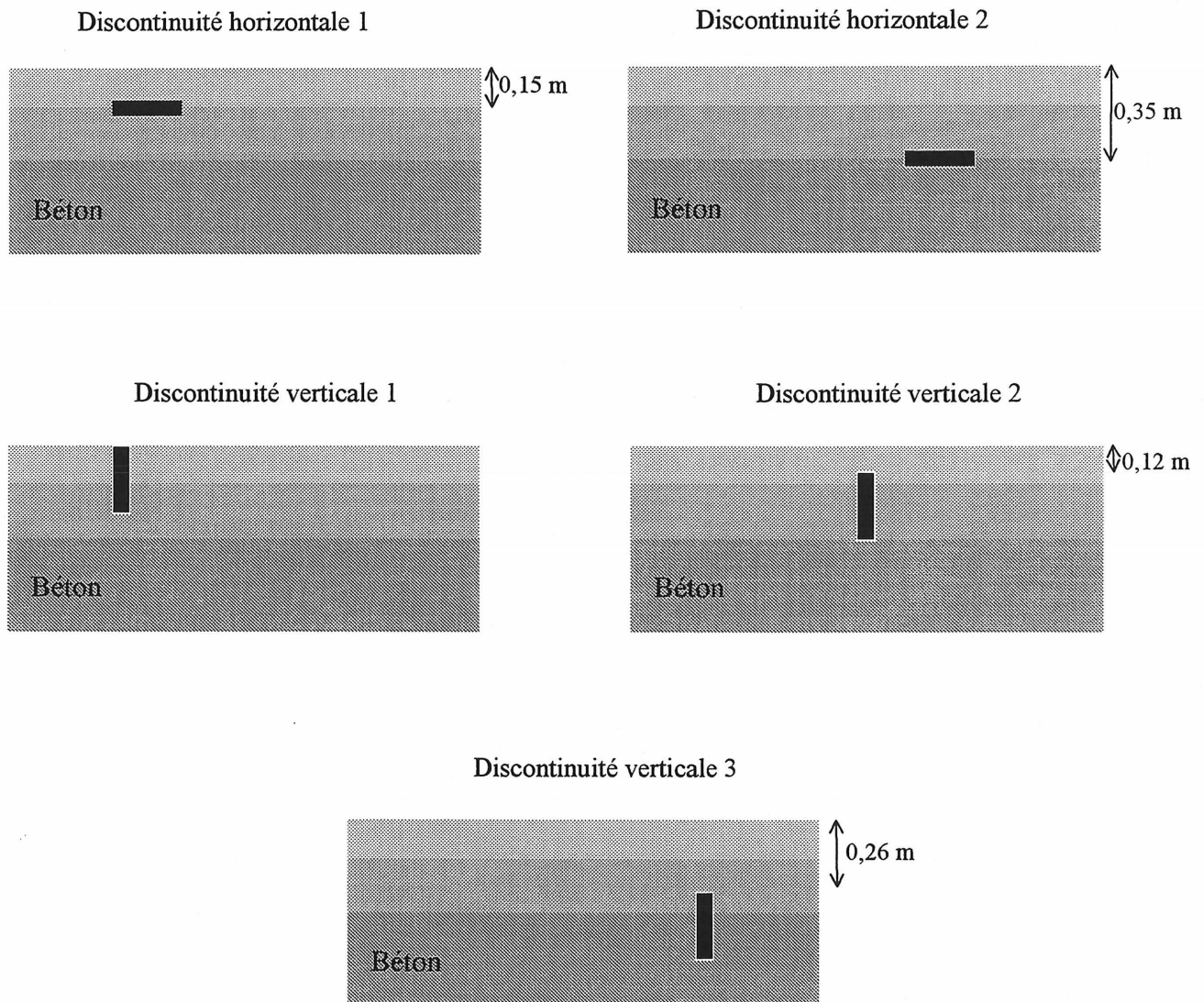


Figure 4.4 Disposition des discontinuités avant la mise en place du béton.

Les discontinuités, de dimensions 0,3 m x 0,15 m, sont simulées par des plaques en polystyrène de 5 cm d'épaisseur (Figure 4.3). Leur module de rigidité est faible et les vitesses de propagation des ondes à travers ces discontinuités sont inférieures à celles dans le béton. Les deux discontinuités horizontales, 1 et 2, ont été mises respectivement à des profondeurs de 0,15 m et de 0,35 m à partir de la surface et à différents endroits dans le bloc. Quant aux discontinuités verticales, elles étaient au nombre de trois. La première débouchait à la surface alors que la seconde et la troisième sont situées respectivement à des profondeurs de 0,12 m et de 0,26 m. Le détail de la disposition des discontinuités est donné sur les figures 4.4 et 4.5.



Figure 4.5 Disposition des discontinuités verticales et horizontales

Les discontinuités ont été installées dans le moule du bloc multicouche avant la mise en place du béton. Cette opération a été effectuée en attachant chacune des plaques en polystyrène avec des fils tendus que l'on a fixé sur les parois du moule (Figure 4.5). Par contre, lors de la mise en place du béton, il a été difficile de maintenir les plaques à leur places respectives. Les discontinuités avaient tendance à se déplacer et à remonter à la surface du béton et il a été nécessaire de faire en sorte que les plaques se déplacent le moins possible. Lors de l'étude des discontinuités, il a été considéré que les caractéristiques décrites sur la figure 4.4 sont respectées.

4.3. Équipements et configurations de mesures

L'application de la technique d'ASOS est essentiellement constituée de deux étapes : la collecte et le traitement des données. La première étape comprend plusieurs phases, soit l'émission, la détection et l'enregistrement des ondes de Rayleigh sous forme de signaux. Pour réaliser ces phases, différents équipements et configurations de mesures ont été utilisés.

Dans un premier temps, l'acquisition et le traitement des signaux ont été effectués avec un analyseur *HP*, tel que décrit dans différentes références bibliographiques [Heisey et coll., 1982; Nazarian et coll., 1983]. L'application de la technique sur les modèles expérimentaux a montré que le traitement des signaux devait être spécifique. Cela a nécessité le développement d'un logiciel de traitement des signaux ainsi que d'un logiciel de commande de la chaîne d'acquisition. D'autres part, afin d'optimiser les paramètres d'essais, différentes sources et capteurs ont été testés.

Dans cette section, les configurations de mesures et les équipements utilisés pour la collecte des données sont présentés et englobent les sources d'émission, les capteurs de détection et le système d'acquisition.

4.3.1. Procédure d'essai et configurations de mesures

Les essais d'analyse spectrale des ondes de surface ont été réalisés sur les blocs homogènes et multicouche en utilisant une procédure similaire à celle décrite dans le chapitre 2. La source et les deux récepteurs sont disposés le long d'une même ligne, et les distances source-premier récepteur et entre récepteurs sont respectivement désignées par *SR* et *RR* (Figure 4.6). Le nombre d'impacts considéré est égal à 5, ce qui a permis d'enregistrer 5 paires de signaux par essai et de

faire la moyenne dans le domaine temporel pour améliorer le rapport signal sur bruit. La position de la source n'a pas été inversée.

Les essais sur les blocs de béton ont été réalisés en faisant appel à deux configurations de mesures : *configuration de mesure 1* et *configuration de mesure 2*. La première consiste à utiliser une distance SR égale à la distance RR . Pour cela trois distances RR ont été considérées sur les quatre blocs, soit 15 cm, 30 cm et 45 cm. L'augmentation de la distance RR a été effectuée par rapport à un même point imaginaire situé au milieu de la distance séparant les deux récepteurs. L'objectif de cette opération est d'étudier l'influence de la distance entre récepteurs sur les résultats.

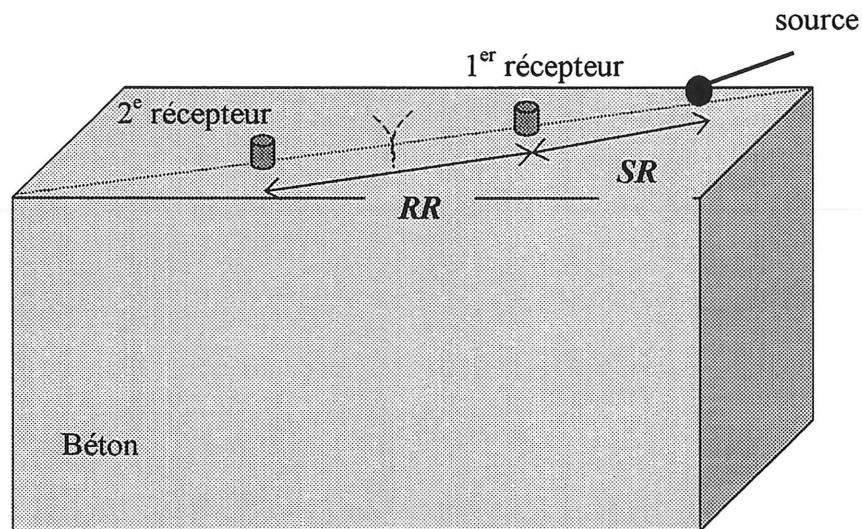


Figure 4.6 Configuration de mesure

Dans la seconde configuration, la distance SR est différente de la distance RR . L'objectif est d'étudier l'influence de la distance source-premier récepteur sur les résultats, la distance RR étant constante. Pour cela, des essais ont été réalisés sur les blocs homogènes et multicouche, en considérant une distance entre récepteurs égale à 30 cm et différentes distances source-premier récepteur soit 0 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm et 40 cm.

Concernant les essais sur les discontinuités, ils ont été réalisés avec la *configuration de mesure 1*. Les récepteurs ont été disposés de part et d'autre des discontinuités et à égale distance comme le montre la figure 4.7. L'augmentation de la distance RR a été effectuée par rapport à un même point imaginaire situé au milieu de la distance séparant les deux récepteurs et centré sur la discontinuité.

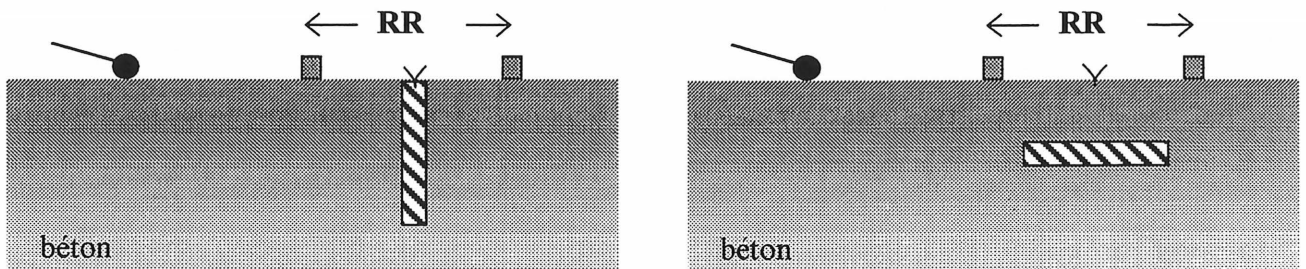


Figure 4.7 Disposition des capteurs lors de l'étude des discontinuités (verticales et horizontales)

Différentes distances RR ont été utilisées dans le but d'étudier son influence sur la détection des discontinuités. Les distances considérées sont 10 cm, 20 cm et 50 cm pour les trois discontinuités verticales et 10 cm, 30 cm et 60 cm pour les discontinuités horizontales.

4.3.2. Les sources d'émission

L'importance de la source d'émission dans l'application de l'analyse spectrale des ondes de surface a été expliquée au chapitre 2. La source permet de réaliser une étape très importante de la technique, soit la génération des ondes de Rayleigh. Cela consiste à créer un mouvement de particules dans le béton qui va se propager dans le matériau. La force d'impact, la masse et le volume de la source ont une influence sur les caractéristiques des ondes générées, notamment sur la bande de fréquence. Dans le cas d'un matériau comme le béton, il est indispensable de générer des ondes contenant des hautes fréquences afin d'obtenir des informations sur les faibles longueurs d'ondes et donc sur le béton proche de la surface. D'autre part, des ondes contenant des basses fréquences permettent d'évaluer le béton sur une plus grande profondeur. Afin d'étudier l'influence de la source et de déterminer celle qui est la plus appropriée pour des essais d'ASOS sur le béton, trois types de sources de caractéristiques différentes ont été utilisés (Figure 4.8).

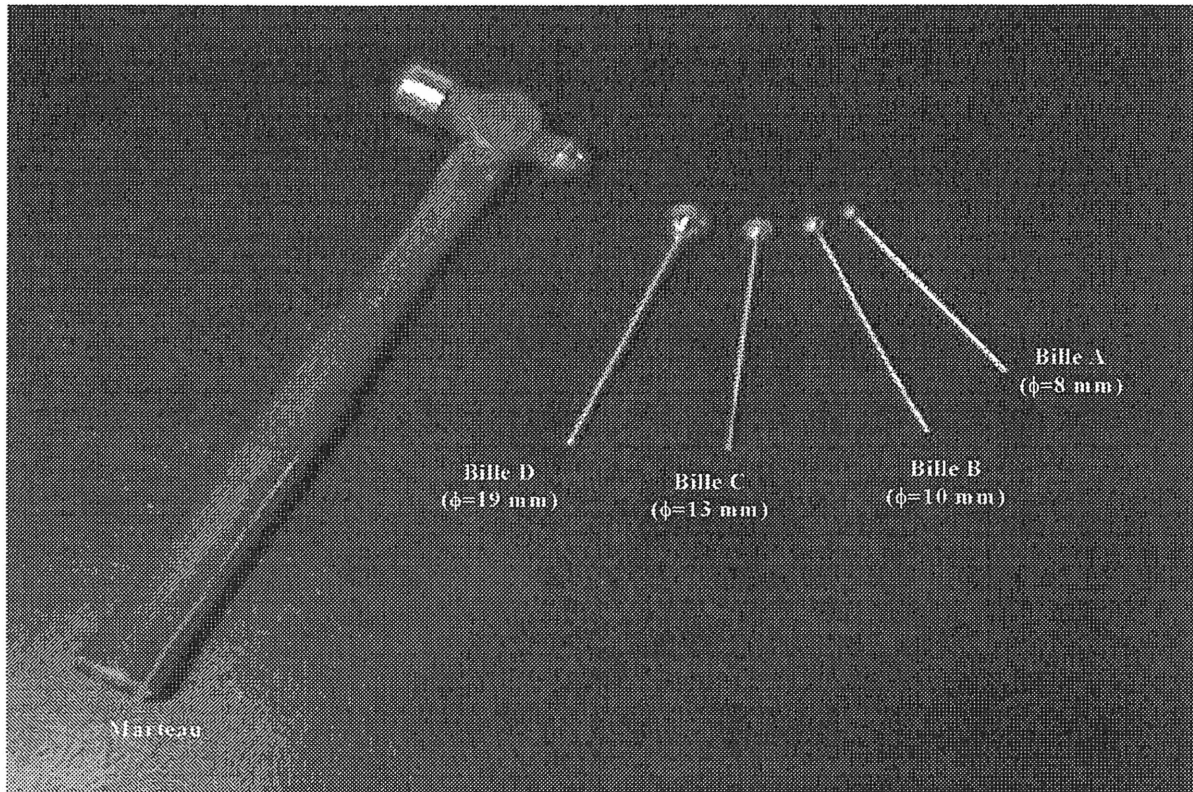


Figure 4.8 Les différentes sources utilisées

La première source est un marteau de 250 grammes (Figure 4.8). Cet outil, très facile à manipuler, est capable de générer des ondes de fréquence allant jusqu'à 10 KHz.

La seconde source est une série de quatre billes en acier trempé de différents diamètres. Elles sont désignées ici par bille A, B, C et D et ont des diamètres respectifs de 8, 10, 13 et 19 mm. Afin de pouvoir les manipuler, des tiges en acier de longueur 10 cm ont été soudées sur les billes. L'utilisation de quatre billes avait pour objectif de disposer de plusieurs sources de différents diamètres afin de varier les fréquences émises et combiner les bandes de fréquences générées par chacune des sources. En effet, les fréquences émises augmentent lorsque le diamètre de la bille diminue.

Un transducteur piézo-électrique a également été utilisé comme source. Son alimentation est assurée par le sonoscope dont les caractéristiques sont données à la section 4.5.1. L'émetteur a une fréquence de résonance de 50 KHz. Son principal avantage est qu'il permet de générer des fréquences supérieures à 30 KHz. Il est également possible de contrôler l'énergie et la fréquence

du signal émis, ce qui n'est pas faisable avec les autres sources. D'autre part, les ondes émises ont des caractéristiques constantes contrairement aux autres sources d'émission qui sont dépendantes du manipulateur (force d'impact, temps de contact).

4.3.3. Les capteurs de détection

Les capteurs de détection utilisés lors des essais d'ASOS sont des accéléromètres. Il s'agit du modèle 353B16 de PCB muni d'un préamplificateur intégré et dont la fréquence de résonance est égale à 80 KHz. Les dimensions de ces accéléromètres sont de 7 mm x 12 mm (diamètre x hauteur).

Des plaques en aluminium ont été fabriquées pour pouvoir les visser sur l'embout de l'accéléromètre. Ces plaques nous ont permis de coller les accéléromètres à la surface du béton.

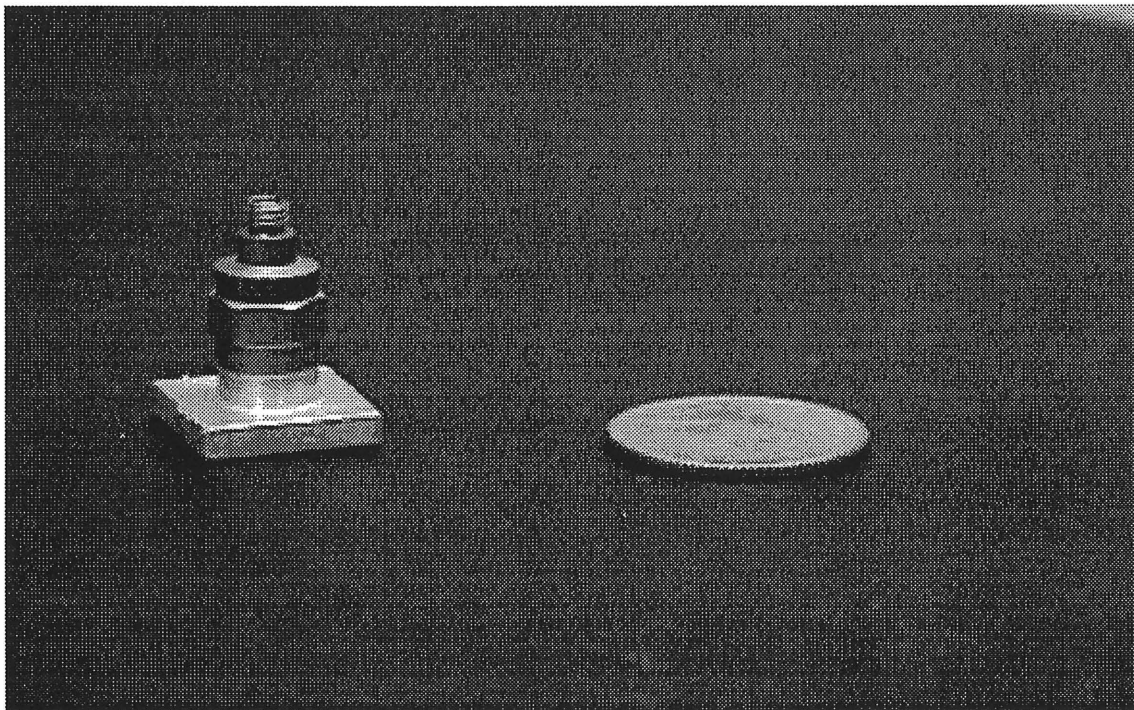


Figure 4.9 Accéléromètre PCB utilisé lors des essais

4.3.4. Le système d'acquisition

4.3.4.1. L'analyseur HP

L'analyseur utilisé est un *Hewlett-Packard HP 35665 A*. L'appareil est doté deux voies, ce qui permet d'enregistrer simultanément deux signaux. Il est muni d'un logiciel de commande pour contrôler l'acquisition des données et le traitement des signaux. Concernant l'échantillonnage, le nombre de points est limité à 2048 et la fréquence à 51,2 KHz. Cette fréquence ne permet pas de numériser des signaux avec une grande qualité. Il en résulte que les informations contenues dans les signaux hautes fréquences (> 25 KHz) peuvent être altérées.

Quant au traitement des données, les possibilités du logiciel sont très poussées. Il permet d'effectuer une moyenne des signaux enregistrés pour chacune des voies, d'appliquer différentes fenêtres (ex : exponentielle) sur les signaux et de calculer plusieurs fonctions de traitement de signal tel que l'interspectre de deux signaux et la cohérence. Il est également possible de dérouler les spectres de phases. Une fois les signaux traités, les résultats sont généralement stockés pour être utilisés sur un ordinateur personnel. Par contre, si l'utilisateur désire effectuer des modifications du traitement, il doit obligatoirement charger ses données sur l'analyseur afin d'exécuter les fonctions désirées. Cela est un énorme inconvénient, d'autant plus que l'appareil est assez complexe d'utilisation et ne permet pas de visualiser les courbes de dispersion. D'autres part, les fonctions de traitement nécessaires pour la technique d'ASOS et disponibles sur l'analyseur ne peuvent pas être modifiées, d'où la limitation de l'équipement pour notre utilisation.

Pour toutes ces raisons, l'analyseur a été rapidement délaissé au profit d'une autre chaîne d'acquisition et du logiciel de traitement des données. Ce dernier a été spécialement développé pour le traitement des données obtenues avec l'ASOS.

4.3.4.2. La chaîne d'acquisition

L'appareil (Figure 3.10) qui a été utilisé dans la majorité des cas d'essais d'ASOS est un système d'acquisition de signaux de type Compu Scope 1012. Il s'agit d'un micro-ordinateur muni de plusieurs cartes d'acquisition qui assurent la numérisation des signaux reçus. La cadence de numérisation maximale est de $0,1\mu\text{s}$ (10 MHz) avec une résolution de 12 bits sur les amplitudes. Le nombre de voies disponibles est 6, ce qui permet d'enregistrer simultanément 6 signaux. Lors

des mesures, la première voie a été utilisée pour déclencher les signaux. Dès que les mouvements de particules sont détectés par les récepteurs, les signaux sont acheminés au conditionneur à l'aide de câbles coaxiaux. Le conditionneur est un appareil qui peut assurer l'entrée et la sortie de 16 voies. Sa fonction principale est l'amplification linéaire indépendante de chacune des voies qui y sont reliées. Les signaux sont par la suite acheminés jusqu'à la chaîne d'acquisition pour être numérisés. La plage d'acquisition permise est très étendue, elle peut atteindre 56 000 points pour chaque canal.

L'opérateur peut contrôler, à l'aide du logiciel de commande «*GAGESCOP*», le nombre de points à utiliser durant la numérisation des signaux ainsi que tous les autres paramètres d'acquisition, notamment la fréquence d'échantillonnage. Ce logiciel permet de visualiser simultanément les signaux enregistrés par les 6 voies et de modifier l'échelle de représentation. Les signaux sont ensuite stockés avec leur désignations respectives.



Figure 4.10 La chaîne d'acquisition

Comparativement à l'analyseur *HP*, le logiciel «*GAGESCOP*» ne permet pas d'effectuer les opérations de traitement du signal nécessaires à l'application de l'ASOS. Afin de remédier à cela, un logiciel de contrôle «*GAGEALI*» a été mis au point (Figure 4.11). Le logiciel permet l'acquisition simultanée de deux signaux seulement.

Le logiciel contrôle les mêmes paramètres d'acquisition que le logiciel «*GAGESCOP*» ainsi que d'autres fonctions (Figure 4.11). Il permet d'effectuer la moyenne des signaux sur plusieurs acquisitions, dans le domaine des temps et dans le domaine des fréquences. Il est également possible d'obtenir et de visualiser les spectres de phase et d'amplitude de la transformée de Fourier des signaux et de l'interspectre de deux signaux. Ces fonctions sont importantes pour analyser le contenu en fréquence des signaux.

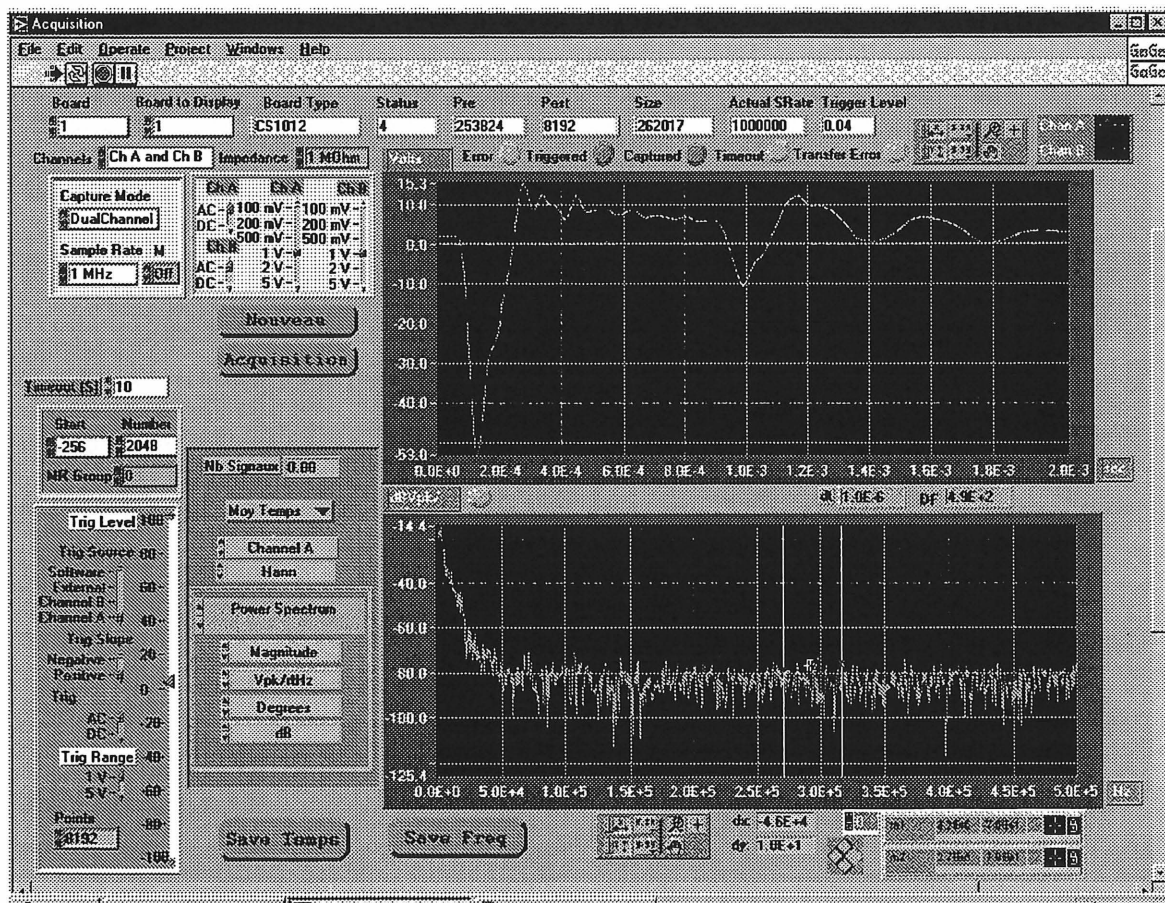


Figure 4.11 Visualisation de l'écran de lecture du logiciel «*GAGEALI*»

Un autre avantage important du logiciel est qu'il permet de visualiser le dernier signal enregistré et de le comparer avec la moyenne des signaux enregistrés. Avec cette opération, il est possible de détecter des mauvais signaux et de les éliminer. Par la suite, les signaux sont stockés dans l'ordinateur avec leur désignations respectives sous format ASCII afin d'être traités avec un logiciel développé suite aux essais en laboratoire sur les modèles expérimentaux.

Les paramètres d'acquisition considérés lors de la réalisation du programme expérimental sont : 200 KHz pour la fréquence d'échantillonnage et 2048 points pour la numérisation des signaux.

4.4. Le traitement des données

Les premiers essais effectués sur les modèles expérimentaux ont rapidement montré que l'application de l'ASOS sur le béton nécessitait un traitement spécifique des données. En effet, il ne suffisait pas d'enregistrer des signaux et de calculer les spectres en fréquences de phase pour obtenir une courbe de dispersion. Il fallait absolument éliminer les réflexions contenues dans les signaux en appliquant des fenêtres efficaces. D'autre part, suite aux essais en laboratoire, un critère de sélection des fréquences a été établi afin d'améliorer la qualité des courbes de dispersion. L'ensemble de ces résultats a permis de définir une procédure de traitement des données pour l'application de la technique sur le béton. Les détails de cette procédure sont donnés dans le chapitre 4 consacré aux résultats et à l'interprétation des essais en laboratoire.

Dans le but d'appliquer la procédure obtenue, le logiciel *SASW* a été mis au point. Ce dernier traite les signaux, calcule et représente la courbe de dispersion. Son utilisation est très simple grâce à une interface graphique. Cet outil permet de visualiser les résultats quelques secondes après l'acquisition, ce qui est très intéressant pour des essais en laboratoire et sur chantier. Un autre avantage est qu'il a été développé spécifiquement pour l'analyse spectrale des ondes de surface et toutes les fonctions disponibles peuvent être modifiées dans le programme source. Cela permet de l'améliorer et de l'adapter pour des utilisations autres que celles concernant l'ASOS.

L'outil a été conçu et s'exécute sur *MATLAB*. Le logiciel se présente sous forme d'un menu visualisé sur l'écran d'un ordinateur personnel (Figure 4.12). Son utilisation peut être divisée en 8 étapes qui sont décrites ci-dessous :

Étape 1 : Démarrer le logiciel en cliquant sur le bouton *RUN*

Étape 2 : Utiliser l'interface graphique située au-dessus des deux figures pour spécifier la fréquence d'échantillonnage F_e (en Hz) des signaux et la distance (en mètre) entre récepteurs.

Étape 3 : Charger les signaux acquis avec le logiciel «*GAGEALI*» sous format ASCII en cliquant sur le bouton *LOAD*.

Étape 4 : Dès que l'utilisateur appui sur le bouton *LOAD*, les signaux sont visualisés sur les deux figures. Il est alors possible d'estimer l'importance des réflexions ainsi que le filtre le plus adapté pour les éliminer. Le logiciel permet de choisir 3 filtres (multiplication du signal par lui même, Kaiser et exponentielle modifiée) ainsi que leurs paramètres spécifiques. Pour cela, il suffit de cliquer sur l'un des trois boutons correspondant à *Signal**n*, à *Kaiser* ou à *Exponentiel*.

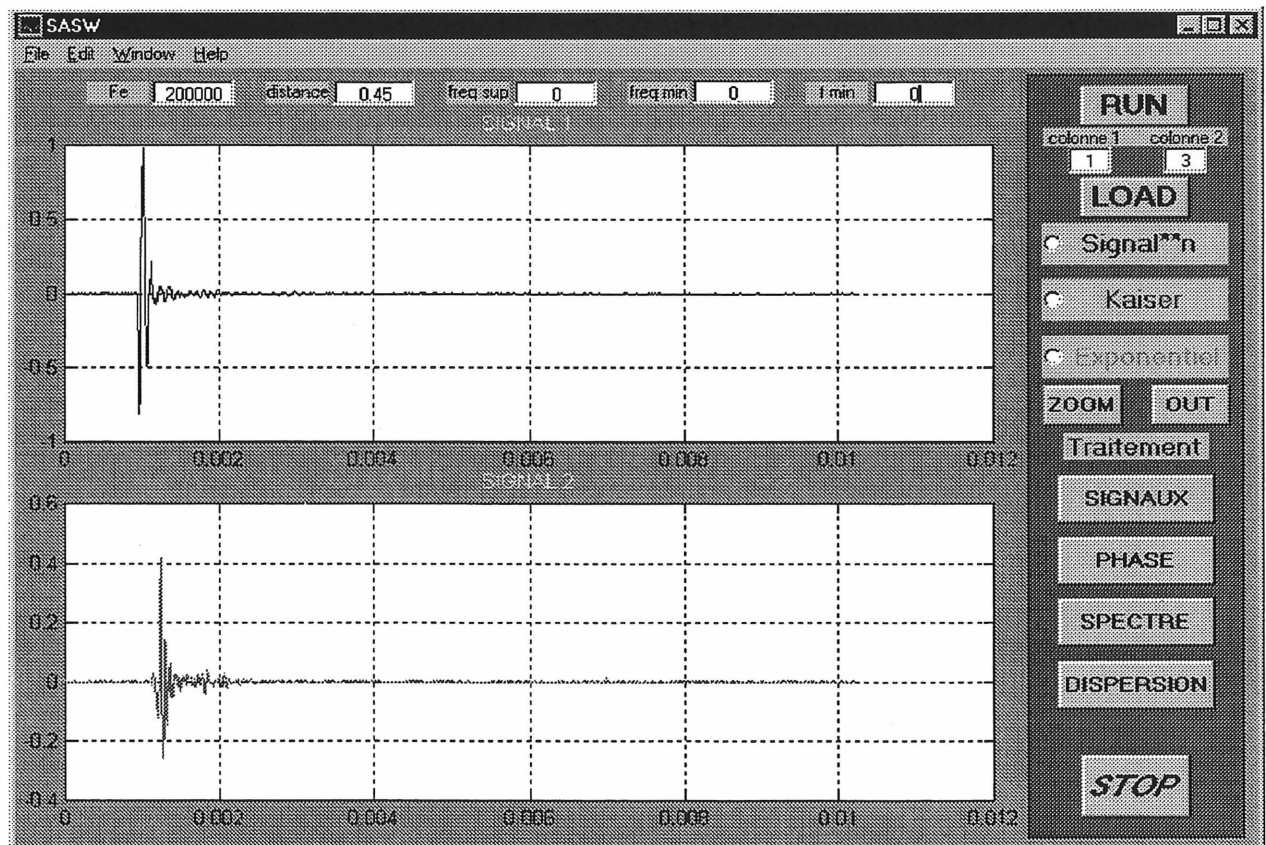


Figure 4.12 Menu du logiciel de traitement de donnée SASW

Étape 5 : En appuyant sur le bouton *SIGNAUX*, les signaux avant et après application de la fenêtre sont visualisés sur quatre figures. Cela a pour but de vérifier l'efficacité de la fenêtre appliquée. L'utilisateur peut revenir à l'étape 4 pour appliquer une autre fenêtre sur les signaux ou poursuivre la procédure avec les signaux filtrés.

Étape 6 : Le bouton *PHASE* fait apparaître le spectre de phase non déroulé de l'interspectre des deux signaux filtrés. Cette opération est utile pour vérifier que l'allure du spectre est correcte et qu'il ne contient pas de saut de phase non justifié.

Étape 7 : Le bouton *SPECTRE* permet le calcul et la visualisation des spectres d'amplitude de l'interspectre. Cette opération permet de sélectionner les fréquences qui seront considérées pour la construction de la courbe de dispersion. Pour cela, il suffit de spécifier, par le biais de l'interface graphique en haut de l'écran, la borne supérieure *freq sup* et la borne inférieure *freq min* de l'intervalle de fréquence sélectionné.

Étape 8 : Le bouton *DISPERSION* permet de calculer et de visualiser la variation de la vitesse en fonction de la fréquence ainsi que la courbe de dispersion (vitesse-longueur d'onde) qui correspond aux fréquences sélectionnées.

Deux options de visualisation ont été ajoutées, il s'agit des fonctions *ZOOM* et *OUT*. La première permet d'agrandir une portion d'une figure que l'on a sélectionnée avec la souris. Quant à la seconde, elle élimine l'agrandissement et rétablit la figure originale. Enfin, la fonction *STOP* met fin au traitement.

4.5. Essais soniques

Des essais soniques ont été réalisés sur les modèles expérimentaux afin de comparer et de discuter les résultats obtenus avec l'ASOS. Cette section décrit l'équipement utilisé ainsi que la procédure employée pour effectuer les essais soniques.

4.5.1. Le soniscope

Cet instrument est un appareil de mesure sonique qui est principalement utilisé pour déterminer les vitesses de propagation à travers un milieu. Il peut également être utilisé comme une simple source d'émission. Il s'agit d'un appareil d'émission et d'acquisition de signaux muni de deux

voies reliées à des transducteurs piézo-électriques qui servent aussi bien pour l'émission que pour la réception (Figure 4.13). Cet appareil a été développé par Hydro-Québec.

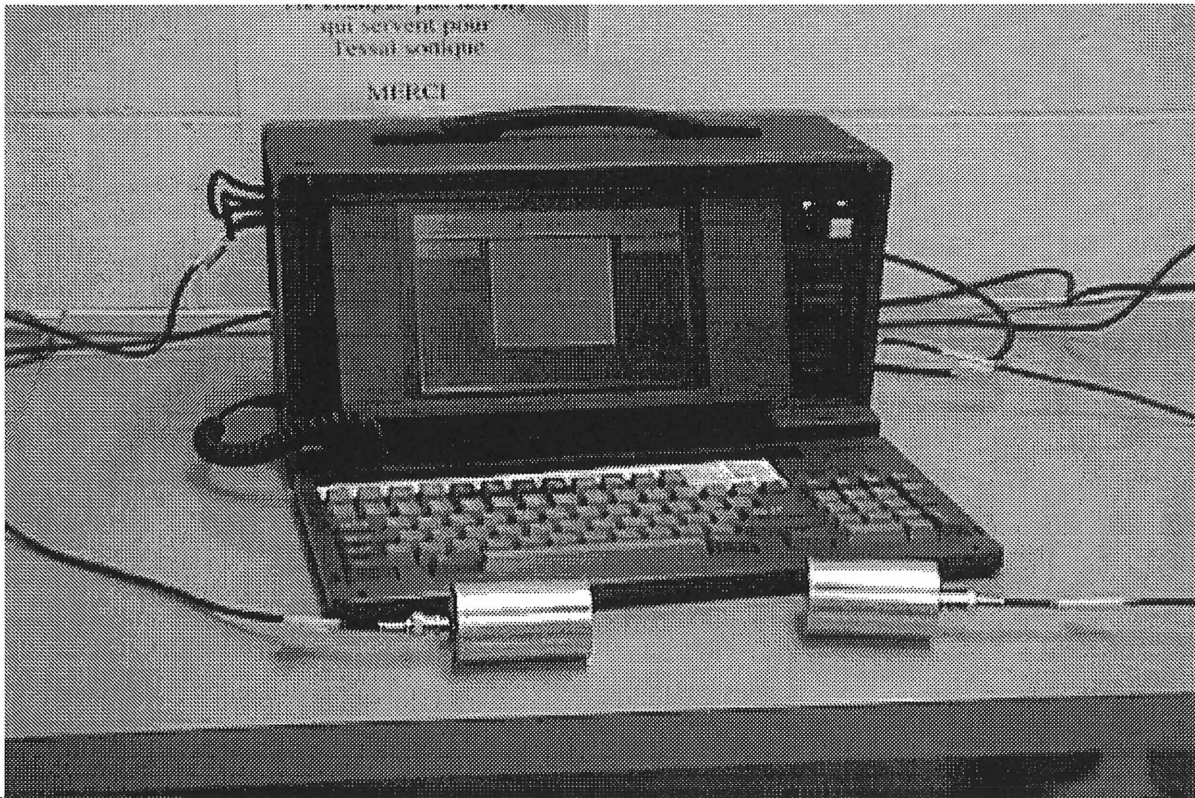


Figure 4.13 Le soniscope

Le récepteur possède les mêmes caractéristiques que le transducteur émetteur. Il est muni d'un préamplificateur à son extrémité. Le préamplificateur est alimenté directement au moyen d'un câble coaxial qui le relie au soniscope. Plusieurs gains sont permis à la réception, variant de 0 dB à 55 dB. Il est possible d'améliorer le rapport signal sur bruit par la fonction *averaging* qui donne la moyenne des signaux reçus. L'appareil assure la conversion du signal analogique en une forme numérisée avec une fréquence d'échantillonnage maximale de 1 MHz.

Le soniscope affiche seulement le signal reçu qui peut être enregistré par commande de l'opérateur. Un curseur permet de mesurer le temps d'arrivée du signal. Ce dernier correspond à la durée de propagation de l'onde entre l'émetteur et le récepteur. Le contrôle et la commande de toutes ces opérations sont exécutés à l'aide d'un logiciel qui permet aussi de modifier les paramètres d'acquisition.

4.5.2. Procédure

Les mesures d'essais soniques ont été réalisées sur les quatre modèles expérimentaux. Le but était de suivre la variation de la vitesse de propagation des ondes P en fonction de la profondeur. Cela permet de vérifier l'homogénéité des blocs et la variation de la qualité pour les différentes couches du bloc multicouche. Afin d'atteindre cet objectif, les mesures de vitesses ont été effectuées le long d'une section située au centre de chacun des blocs. Le pas de mesure en profondeur a été fixé à 5 cm (Figure 4.14).

Pour augmenter la précision de la mesure du temps de propagation, les essais sur les blocs homogènes ont été effectués le long de la plus grande dimension, soit 1,4 m.

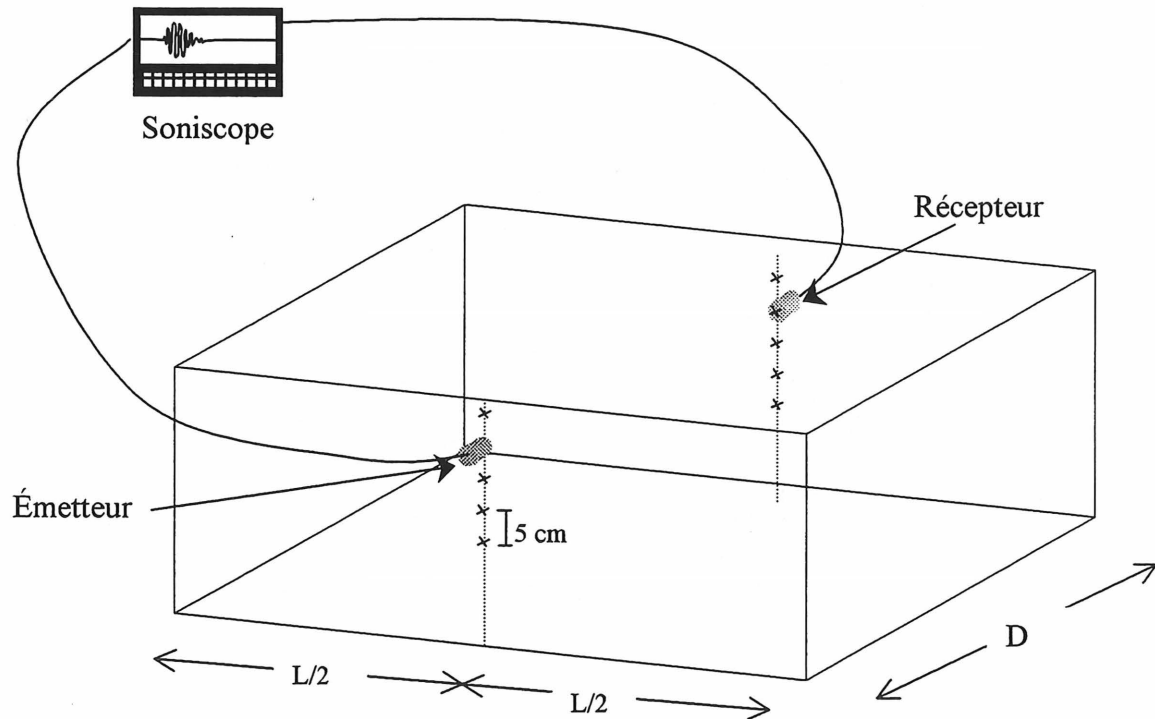


Figure 4.14 Essai sonique

CHAPITRE 5

PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

5.1. Application de l'analyse spectrale des ondes de surface sur le béton

Au cours du chapitre 3, nous avons vu que l'application de la technique sur le béton nécessite l'élimination des réflexions contenues dans les signaux et l'établissement d'un critère de sélection des longueurs d'onde. Pour atteindre ces deux objectifs, différentes fenêtres ont été développées pour atténuer l'effet des réflexions et un critère de sélection des longueurs d'onde a été mis au point en se basant sur les résultats de nombreux essais réalisés sur les modèles expérimentaux. Une procédure de traitement des données pour l'ASOS a également été établie.

Dans ce qui suit, il est question de montrer l'influence des réflexions sur les résultats de l'ASOS, et de présenter les fenêtres utilisées pour les éliminer ainsi que le critère de sélection de longueurs d'ondes. Les différentes étapes de la procédure adoptée pour le traitement des données sont également décrites.

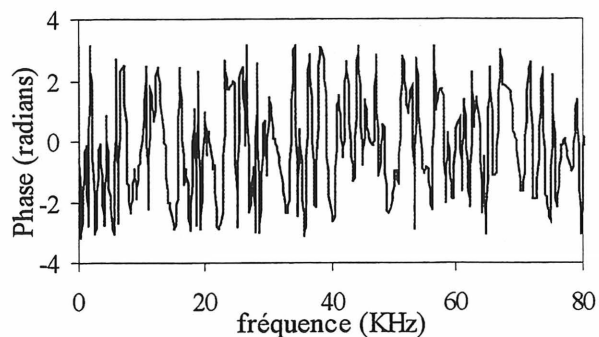
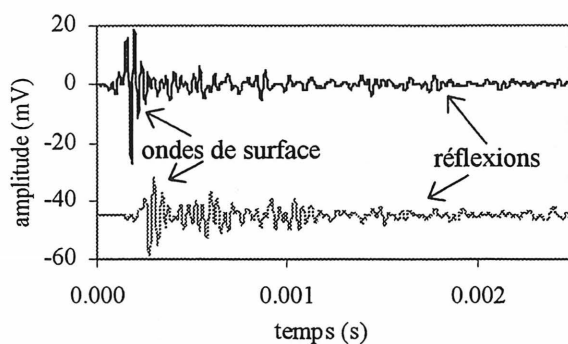
5.1.1. Influence des réflexions sur les résultats

Les signaux enregistrés sur le béton contiennent une première arrivée d'énergie qui correspond aux ondes directes de volume et de Rayleigh et une part d'énergie de réflexions qui arrivent en retard relativement aux ondes directes. L'influence de ces réflexions sur les résultats est très importante et cela a été constaté dès les premières applications de la technique sur le béton. Celles-ci ont été réalisées sur les blocs homogènes et multicouche, plus de 30 jours après la mise en place du béton, et en utilisant la *configuration de mesure 1*, la bille C et les accéléromètres PCB.

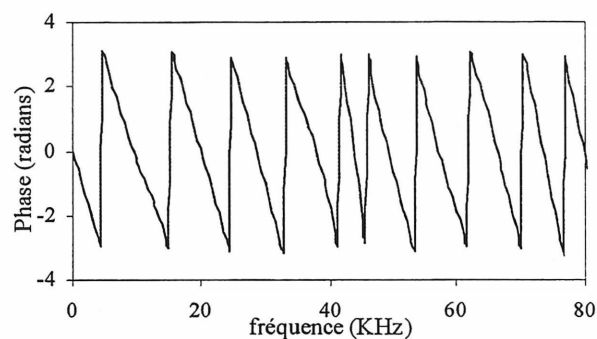
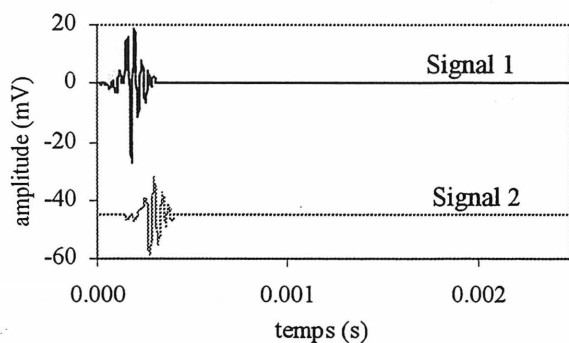
Un exemple de spectre de phase obtenu lors de ces essais est présenté sur la figure 5.1-a. Ce type de spectre est de très mauvaise qualité et il ne permet pas de construire une courbe de dispersion. Les essais ont été répétés sur les modèles expérimentaux, en utilisant différentes sources et en considérant des distances SR et RR variant entre 15 cm et 45 cm. Les résultats de ces essais ont également donné le même type de spectre de phase que celui de la figure 5.1-a.

Étant donné que le spectre de phase est obtenu à partir des signaux, il semble que se sont les réflexions contenues dans les signaux qui sont à l'origine de la mauvaise qualité des spectres. Afin de le confirmer, nous avons procédé à un test sur des signaux obtenus lors d'un essai d'ASOS. Ce test consiste à calculer le spectre de phase pour trois cas. Concernant le premier cas, aucune modification n'a été apportée sur les signaux. Pour le second cas, les réflexions contenues dans les signaux ont été éliminées. Dans le dernier cas, seules les réflexions ont été prises en compte. Comme l'énergie des ondes de Rayleigh est dominante dans les signaux enregistrés à la surface du béton, nous avons considéré que le train d'onde de fortes amplitudes correspond aux ondes de Rayleigh. Quant aux réflexions, elles sont essentiellement contenues dans le train d'onde qui arrive après les ondes de Rayleigh.

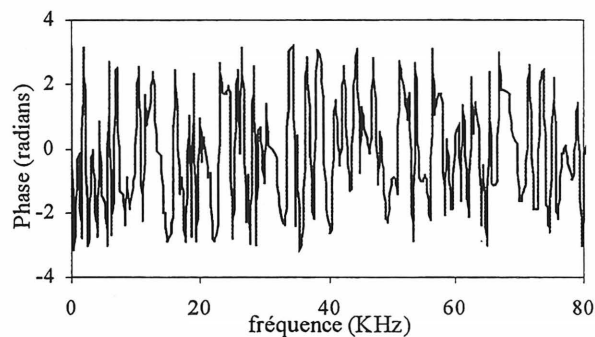
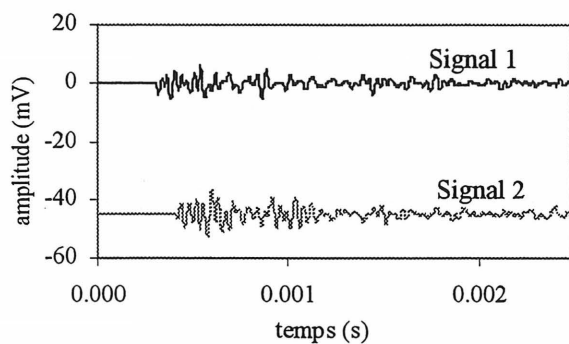
Les résultats de ce test sont donnés sur la figure 5.1. Dans le premier cas, le spectre de phase obtenu est très mauvais. Pour le deuxième cas, l'élimination des réflexions dans les signaux a permis d'obtenir un spectre de phase (Figure 5.1-b) qui peut être utilisé pour calculer une courbe de dispersion. Par contre, lorsque les ondes de Rayleigh sont éliminées et que seules les réflexions sont considérées, on obtient un spectre de phase inexploitable et similaire à celui du cas (a) (Figure 5.1-c). Ce test montre que les réflexions sont bien à l'origine de la mauvaise qualité des spectres de phase et que leur effet est très important. Il est impératif d'éliminer les réflexions contenues dans les signaux. Pour cela, il faut atténuer l'énergie des ondes qui arrivent après les ondes de Rayleigh.



cas (a) aucune modification n'est apportée sur les signaux



cas (b) seul le train d'onde de fortes amplitudes est considéré dans les signaux



cas (c) le train d'onde de fortes amplitudes est éliminé des signaux

Figure 5.1 Influence du train d'onde de fortes amplitudes et des réflexions sur le spectre de phase

5.1.2. Élimination des réflexions

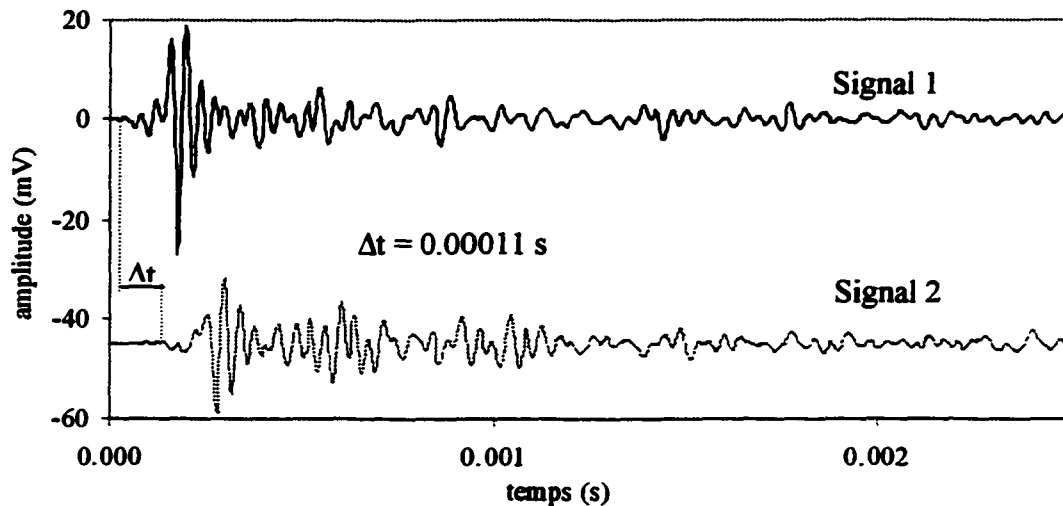
La technique la plus utilisée pour atténuer les réflexions est l'application d'une fonction fenêtre aux signaux enregistrés (filtrage). Elle consiste à multiplier le signal par une fonction $f(t)$, que l'on appelle fenêtre. Dans le cadre de cette étude, trois fenêtres développées pour éliminer les réflexions contenues dans les signaux sont présentées en plus de la fenêtre exponentielle utilisée par certains auteurs.

5.1.2.1. Fenêtre exponentielle

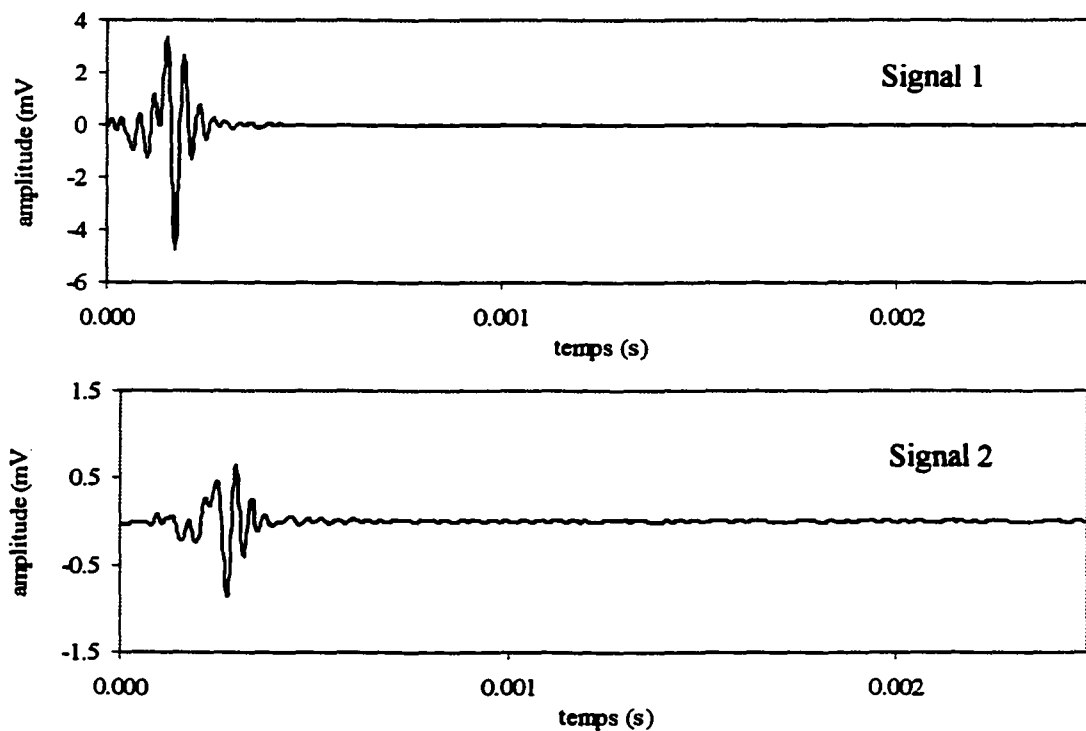
Dans le chapitre 3, la fenêtre *exponentielle* a été présentée. Cette dernière est citée dans de nombreuses références [Bay et Stokoe, 1991; Kalinski, 1994]. La fonction est définie par $f(t)=e^{-t/\tau}$ où t est le temps et τ est un paramètre qui contrôle la pente de décroissance de la fonction (la pente augmente lorsque τ diminue). Elle a pour effet de diminuer l'énergie des réflexions relativement à celle des ondes de Rayleigh. La figure 5.2 illustre l'effet de la fonction fenêtre sur la même paire de signaux que celle de la figure 5.1-a. La fonction considérée est $f(t)=e^{-t/0,0001}$. Le choix du facteur τ est effectué par l'opérateur, de manière à atténuer les réflexions sans apporter de modifications importantes sur le train d'onde de Rayleigh. Les résultats de la figure 5.2 montre que la fonction fenêtre *exponentielle* permet de diminuer significativement l'énergie des réflexions contenues dans les signaux 1 et 2. L'allure du train d'onde de Rayleigh a été sauvegardée et seules les amplitudes ont été diminuées.

L'utilisation de la fenêtre exponentielle présente toutefois un inconvénient qui peut affecter la qualité des résultats. En effet, la même fenêtre est appliquée sur les deux signaux. Or, les ondes de Rayleigh du second signal arrivent avec un retard Δt relativement au train d'onde de Rayleigh du premier signal. Lorsque ce décalage augmente, la fenêtre appliquée a toujours le même effet sur le premier signal mais elle modifie autrement le second signal. Pour illustrer ce phénomène, la même paire de signaux a été utilisée en considérant trois décalages Δt . L'accroissement du retard correspond à une augmentation du temps de propagation de l'onde entre le récepteur 1 et 2, et donc de la distance entre les récepteurs (RR). La même fenêtre ($f(t)=e^{-t/0,0001}$) a été appliquée dans les trois cas. Les résultats sont présentés sur la figure 5.3. Ils indiquent que l'augmentation du retard des ondes de Rayleigh dans le second signal a pour effet d'atténuer les réflexions mais aussi de changer l'allure du train d'onde de fortes amplitudes. Cela a pour conséquence de

modifier les informations contenues dans le signal. Cet exemple montre que la fenêtre *exponentielle* présente des limites et qu'il ne faut pas toujours l'utiliser sur le même intervalle de temps pour les deux signaux.



(a) Avant l'application de la fenêtre



(b) Après l'application de la fenêtre exponentielle

Figure 5.2 Effet de l'application d'une fenêtre exponentielle ($f(t)=e^{-t/\tau}$) sur deux signaux enregistrés à la surface d'un bloc de béton.

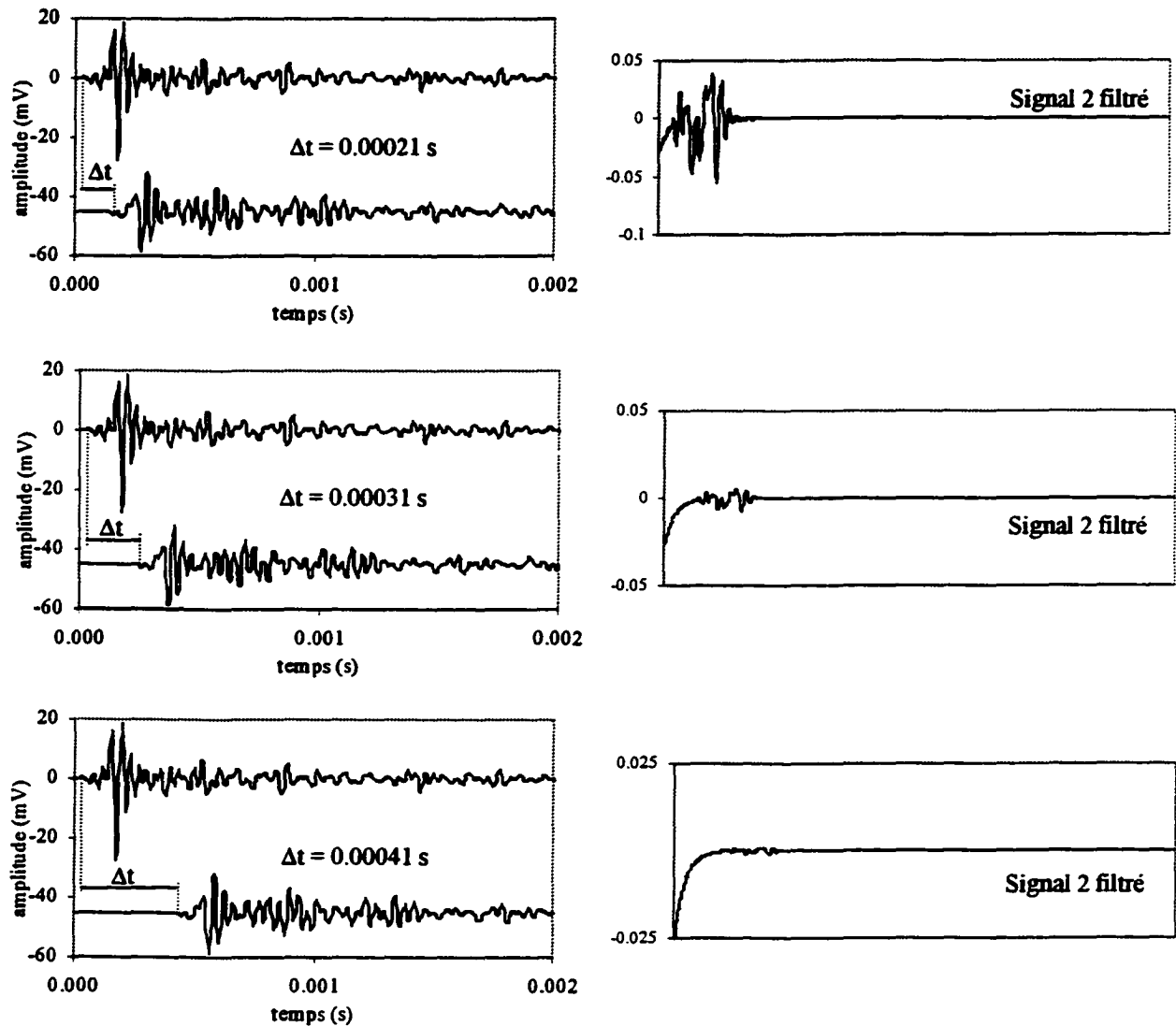


Figure 5.3 Effet de la fenêtre *exponentielle* sur le second signal en fonction du temps d'arrivée du signal 2 par rapport au signal 1.

5.1.2.2. Fenêtre exponentielle modifiée

Jusqu'à présent, nous avons vu qu'il faut absolument éliminer les réflexions et tenir compte du temps d'arrivée des ondes de Rayleigh dans les deux signaux. Pour répondre à ces deux impératifs, la fenêtre *exponentielle* a été modifiée afin d'atténuer seulement les ondes qui arrivent après les fortes amplitudes.

La fenêtre *exponentielle modifiée* présente les mêmes caractéristiques que la fenêtre *exponentielle*. Elle se différencie par l'intervalle de temps pendant lequel elle agit. En effet, la fenêtre *exponentielle* est utilisée sur tout le signal alors que la fenêtre *exponentielle modifiée* n'est appliquée qu'à partir de l'amplitude maximale du signal. Cela permet de tenir compte de l'arrivée des ondes de Rayleigh, de ne pas modifier leur allure et d'atténuer les réflexions. La fonction *exponentielle modifiée* est définie par :

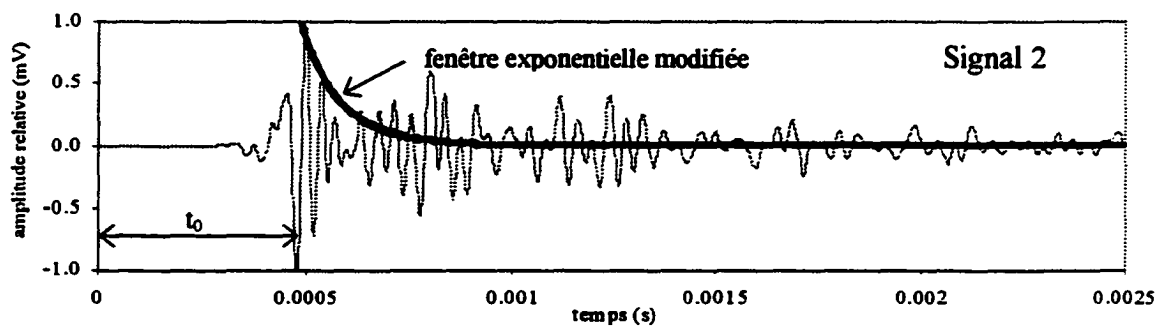
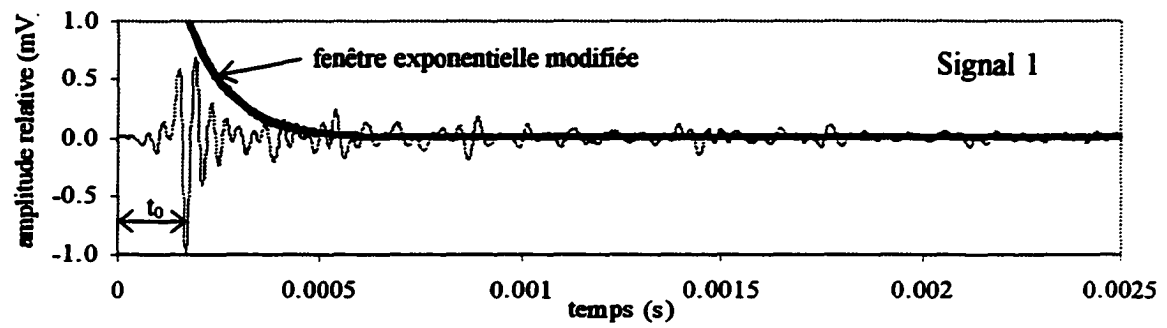
$$\begin{aligned} f(t) &= 1 && \text{pour } t < t_0 \\ f(t) &= e^{-(t-t_0)/\tau} && \text{pour } t \geq t_0 \end{aligned}$$

Où t est le temps, t_0 est le temps correspondant à l'amplitude maximale (en valeur absolue) du signal et τ est le paramètre qui permet de contrôler la pente de la fonction. Les valeurs de τ sont les mêmes pour les deux signaux et elles varient généralement entre 40 μs et 700 μs .

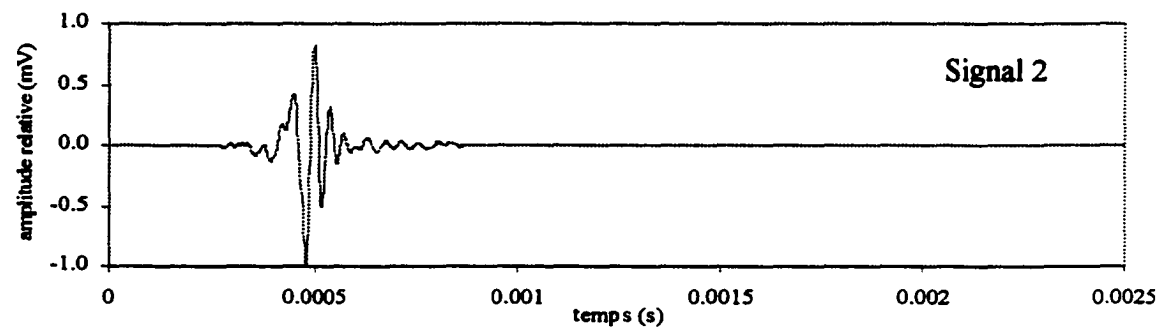
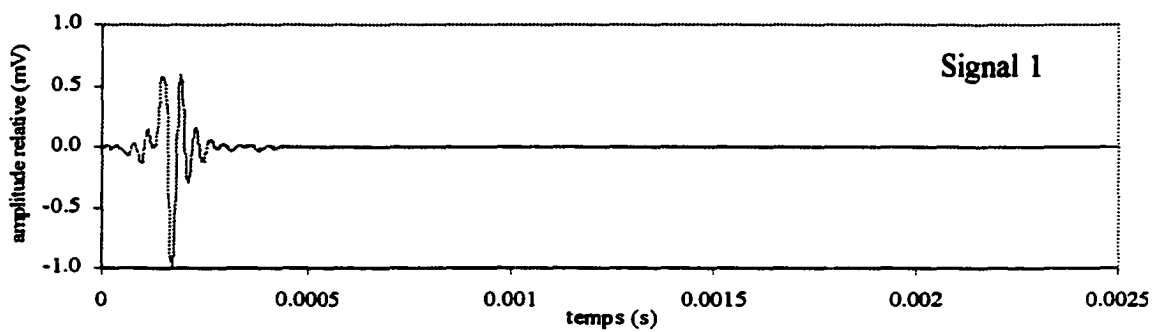
La figure 5.4 illustre un exemple d'application de la fenêtre *exponentielle modifiée* ($\tau=100 \mu\text{s}$) sur la paire de signaux utilisée précédemment. Dans ce cas, les amplitudes relatives correspondent au rapport des amplitudes du signal sur l'amplitude maximale. Les résultats obtenus montrent que le train d'onde de Rayleigh n'est pas affecté par la fenêtre alors que les réflexions sont fortement atténuées.

5.1.2.3. La fenêtre Kaiser

La fenêtre *exponentielle modifiée* permet d'atténuer les réflexions sans apporter de modification au train d'onde de Rayleigh. Par contre, la fonction ne prend pas en considération la présence des ondes directes de volume. D'après Sheu (1987), ces ondes ont peu d'influence relativement aux réflexions. Pour vérifier cette hypothèse, une fenêtre capable d'atténuer les réflexions et les ondes directes de volume est proposée afin de comparer les résultats avec ceux obtenus en utilisant la fenêtre *exponentielle modifiée*. Parmi toutes les fenêtres disponibles dans le logiciel *MATLAB*, la fonction fenêtre *Kaiser* est la plus intéressante.



(a) signaux avant application de la fenêtre



(b) signaux après application de la fenêtre

Figure 5.4 Efficacité de la fenêtre *exponentielle modifiée* pour éliminer les réflexions

L'allure de cette fenêtre est une cloche qui permet d'envelopper le train d'ondes de Rayleigh et d'atténuer les amplitudes avant et après le train d'onde de Rayleigh. Afin de minimiser les ondes directes de volume et les réflexions, la fenêtre *Kaiser* est centrée sur l'amplitude maximale du signal, et donc sur les ondes de Rayleigh. Le logiciel *MATLAB* permet de contrôler la pente de décroissance de la cloche en spécifiant un paramètre d'amortissement δ . La figure 5.5 illustre les caractéristiques de la fenêtre *Kaiser* pour différentes valeurs de δ . Cette fenêtre est très intéressante parce que le train d'onde correspondant aux ondes de Rayleigh n'a pas toujours la même durée sur tous les signaux. L'opérateur peut ainsi ajuster la valeur de δ selon la forme du signal. Les valeurs de δ sont généralement comprises entre 40 et 200.

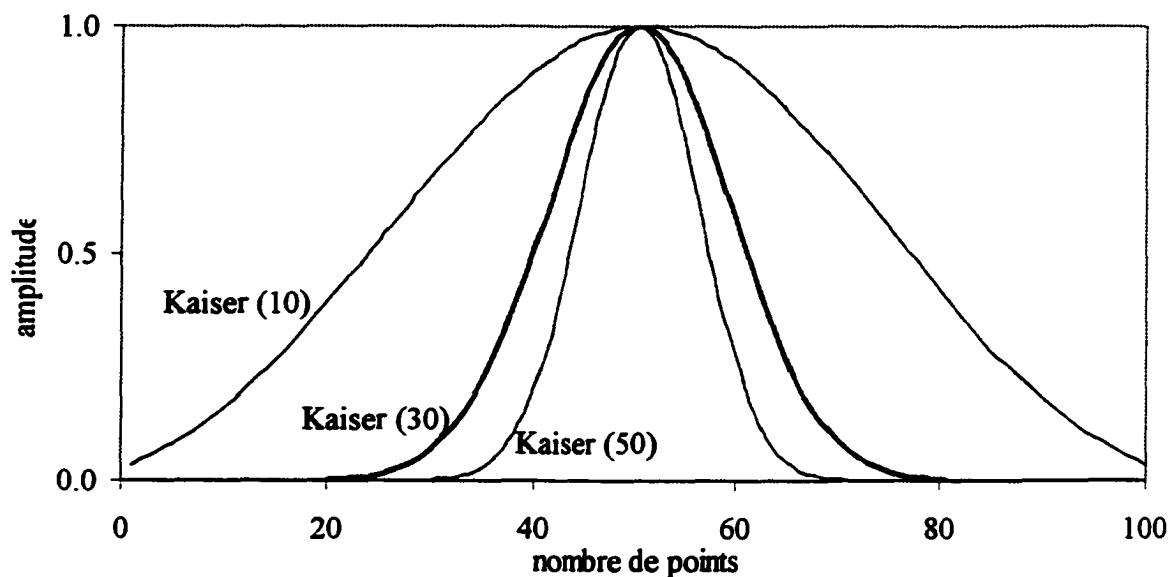
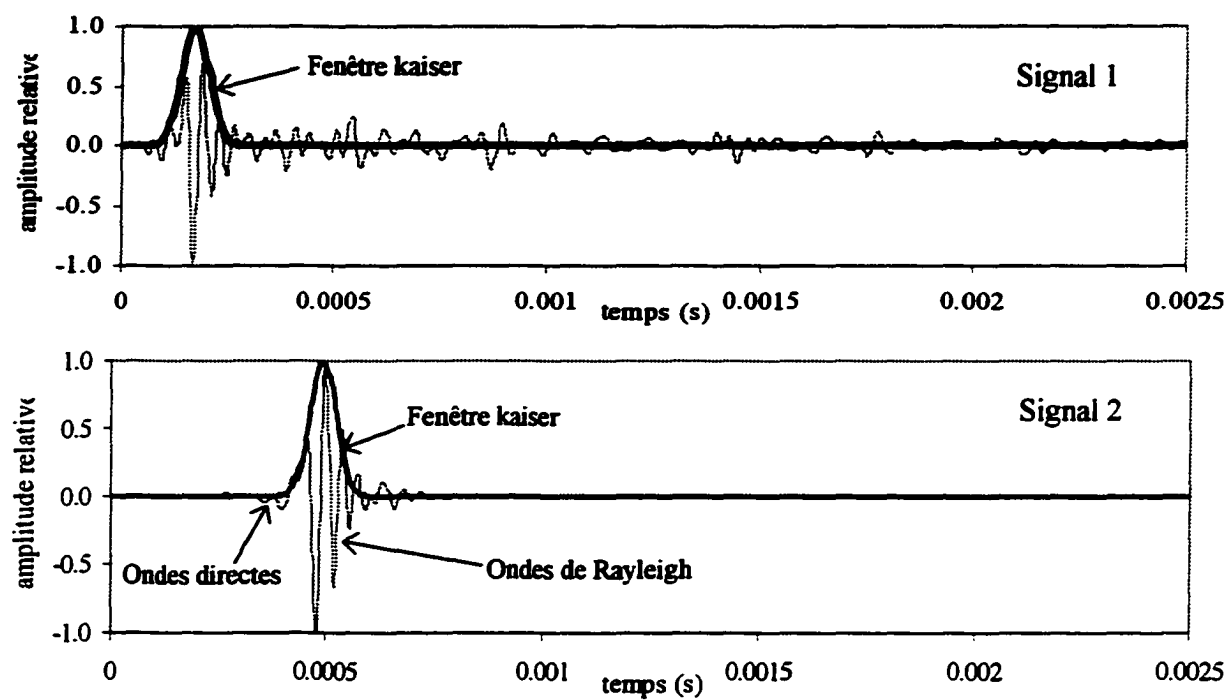


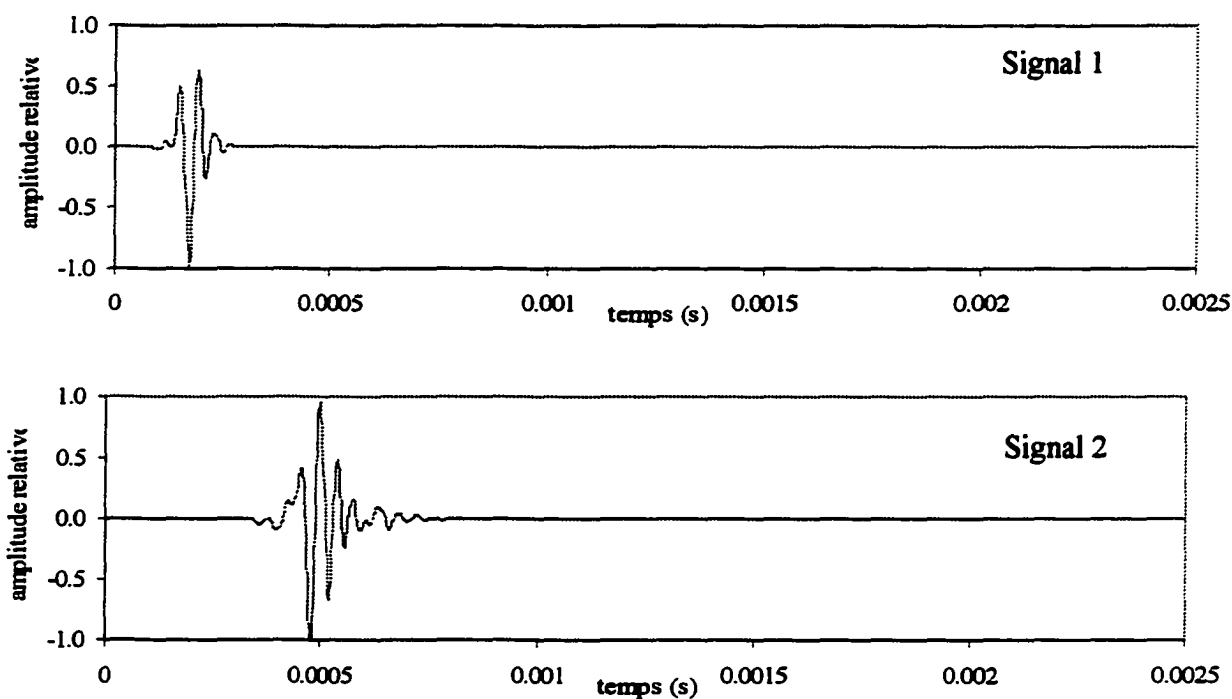
Figure 5.5 Caractéristiques de la fenêtre *Kaiser*

Un exemple d'application de la fenêtre est donné sur la figure 5.6. La paire de signaux utilisée est la même que celle des exemples précédents. La valeur de δ considérée est égale à 60. La fenêtre filtre adéquatement les deux signaux, de sorte que le train d'onde de Rayleigh ne soit pas modifié alors que les ondes directes de volume et les réflexions sont fortement atténuées.

Le logiciel de traitement de données *SASW* développé avec *MATLAB* permet de déterminer l'amplitude maximale des signaux et d'en tenir compte lors de l'utilisation des fenêtres *exponentielle modifiée* et *Kaiser*.



(a) signaux avant application de la fenêtre

(b) signaux après application de la fenêtre *Kaiser* (60)**Figure 5.6** Efficacité de la fenêtre *Kaiser* pour éliminer les réflexions et atténuer les ondes directes de volume

5.1.2.4. Fenêtre "multiplication du signal par lui-même"

La dernière approche utilisée pour éliminer les réflexions est l'application de la fenêtre *multiplication du signal par lui-même*. Cette procédure de filtrage consiste à multiplier le signal par lui-même un certain nombre de fois. Elle a pour effet d'amplifier les fortes amplitudes et de diminuer les faibles amplitudes. Cela a pour conséquence d'atténuer aussi bien les réflexions que les ondes directes de volume (Figure 5.7). Cette opération est favorable pour les ondes de Rayleigh et elle est définie par :

$$S(t)=s(t)^n$$

Où t est le temps, $S(t)$ est le signal obtenu après application de la fenêtre, $s(t)$ est le signal enregistré par les récepteurs et n est un entier choisi par l'utilisateur. L'entier n doit obligatoirement être impaire ($n=1, 3, 5 \dots$) sinon les amplitudes négatives prennent des valeurs positives. On considère généralement un n égal à 3 ou à 5.

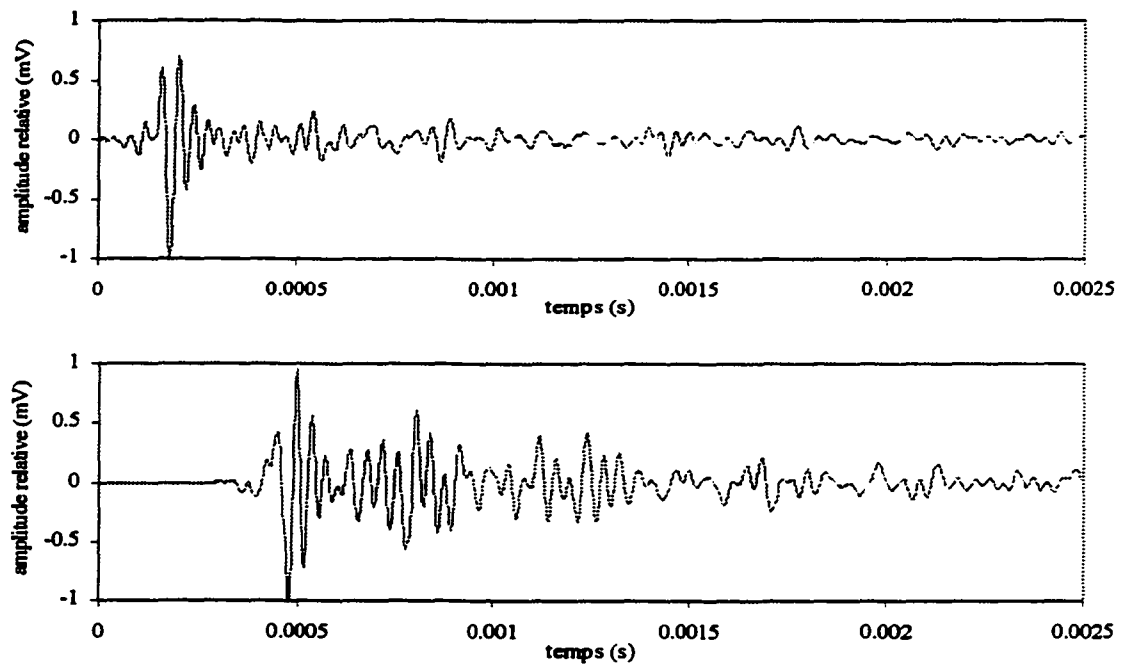
Cette fenêtre est très avantageuse car elle est très simple et elle ne fait intervenir aucun paramètre si ce n'est le signal lui-même. Cela permet de minimiser l'intervention de l'opérateur lors du traitement des signaux. À notre connaissance, cette procédure n'a jamais été utilisée par d'autres chercheurs.

5.1.3. Critère de sélection des longueurs d'ondes

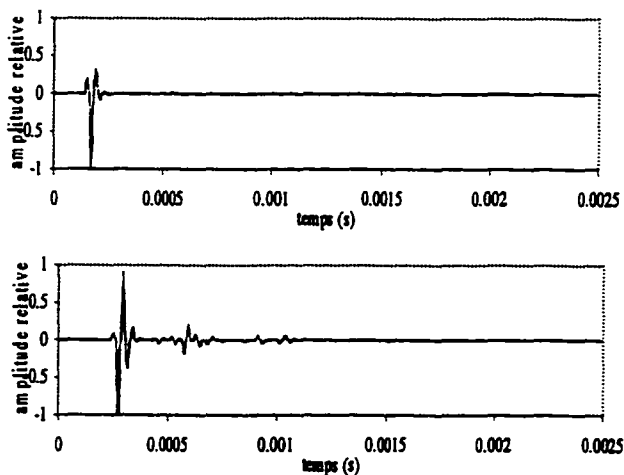
L'étape suivante, après l'obtention d'un spectre de phase exploitable, concerne le calcul de la courbe de dispersion. Celle-ci est généralement construite en respectant l'un des deux critères de sélection des longueurs d'ondes définis dans le chapitre 3. Afin d'évaluer la performance de ces deux critères, des essais d'ASOS ont été réalisés sur les trois blocs homogènes en utilisant la *configuration de mesure 1* et la bille C ($\phi=13$ mm). Pour tous les blocs, les essais ont été effectués suivant les 2 diagonales. Plusieurs distances entre récepteurs ont été considérées, soit 15 cm, 30 cm et 45 cm. Quant au traitement des signaux, il a été effectué avec la fenêtre *exponentielle modifiée*.

L'application des deux critères de sélection sur les données obtenues à la suite des essais n'a pas permis d'avoir des résultats satisfaisants. En effet, les vitesses de propagation des ondes de

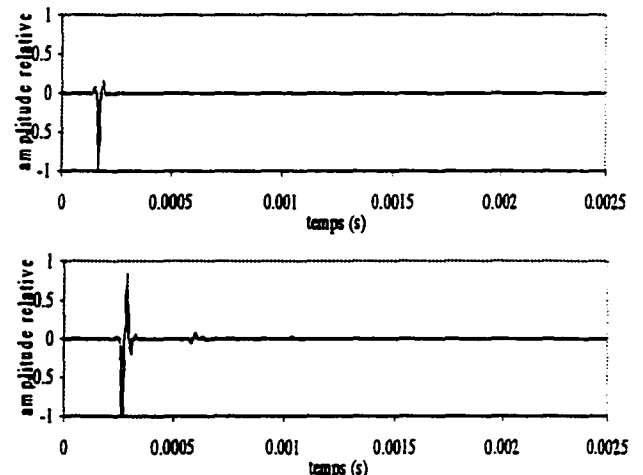
Rayleigh présentent de grandes variations pour les longueurs d'ondes sélectionnées avec les deux critères. Or, les blocs sont homogènes et la vitesse devrait être stable suivant la profondeur. D'autres part, les deux critères sont contradictoires.



(a) signaux avant application de la fenêtre



(b) pour $n=3$



(c) pour $n=5$

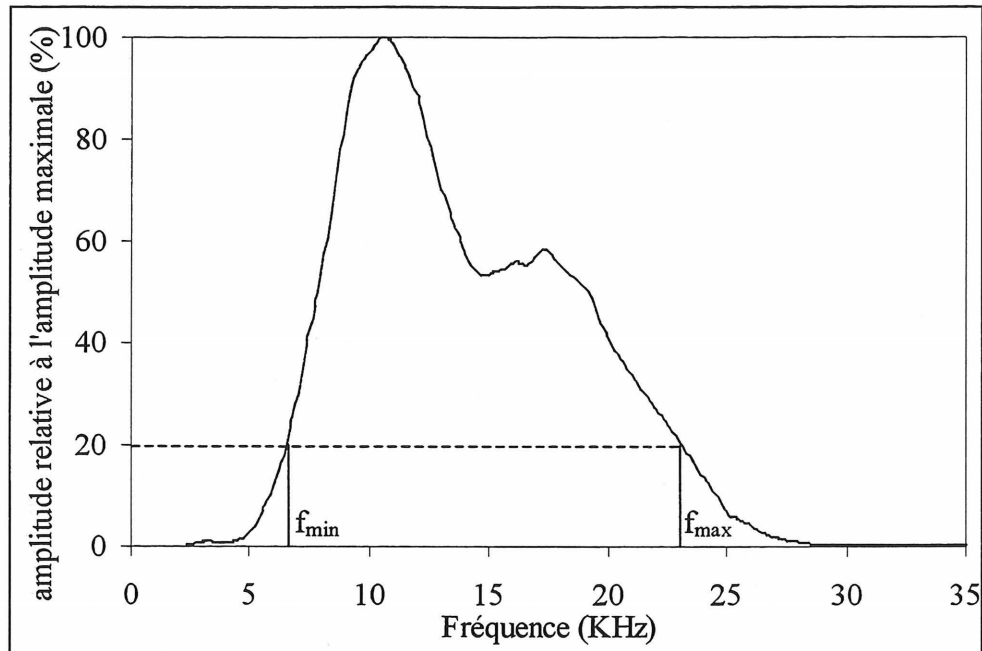
Figure 5.7 Efficacité de la fenêtre *multiplication du signal par lui-même* pour éliminer les réflexions

La procédure de sélection des longueurs d'ondes retenue dans le cadre de ces travaux est de considérer un intervalle de longueur d'onde $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ auquel correspond un intervalle de fréquence $[f_{\min}, f_{\max}]$ du spectre d'amplitude. L'intervalle de fréquence considéré correspond à l'intervalle dans lequel l'amplitude est supérieure à 20% de l'amplitude maximale du spectre (Figure 5.8-a). Ce pourcentage, déterminé sur la base de plusieurs essais, permet de ne pas prendre en compte les composantes en fréquence de faible énergie et de garder la bande de fréquence qui permet d'explorer un intervalle de longueur d'onde significatif. La qualité des informations contenues dans les deux signaux est en fait meilleure pour les fréquences qui ont une grande énergie.

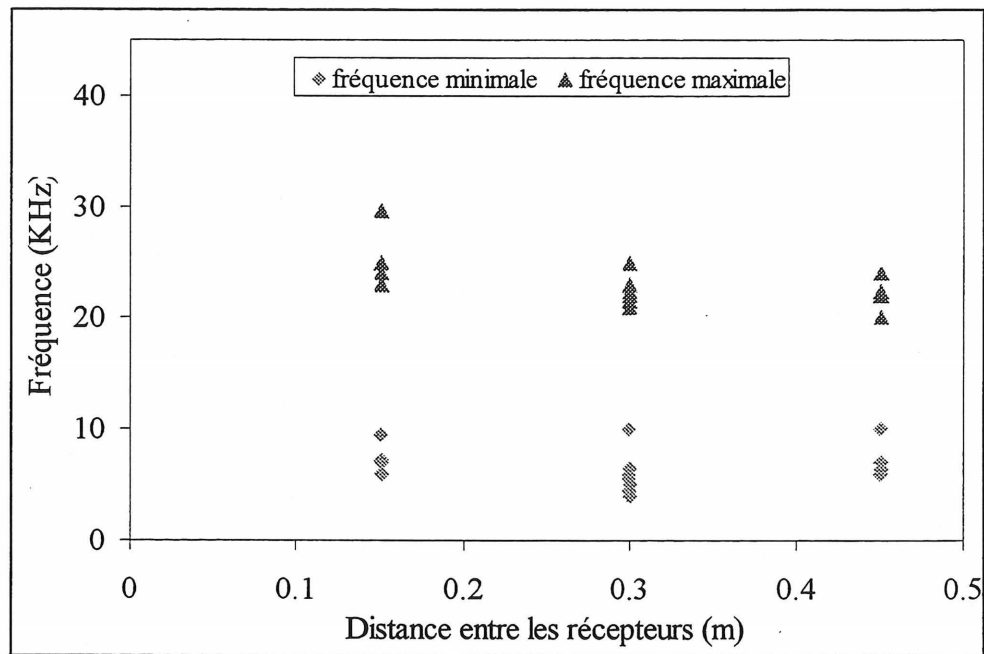
Les valeurs moyennes de f_{\min} et f_{\max} pour les trois distances source-récepteur considérées (0.15 m, 0.30 m et 0.45 m) sur les trois blocs homogènes sont données dans la figure 5.8-b. Ces valeurs sont approximativement constantes quelle que soit la distance, et elles sont de l'ordre de 8 KHz pour f_{\min} et 25 KHz pour f_{\max} .

La figure 5.9-b est déduite des courbes qui donnent la variation de la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh en fonction de la fréquence. Les valeurs de f_{\min} et f_{\max} correspondent dans ce cas à la bande de fréquence pour laquelle la variation de la vitesse relativement à la vitesse moyenne est inférieure à 5 % (Figure 5.9-a). Cela suppose que les blocs sont homogènes, et par conséquent que les variations des vitesses sont très faibles. La vitesse moyenne pour chacune des courbes de dispersion correspond à la moyenne des vitesses de propagation des ondes de Rayleigh pour des longueurs d'ondes comprises entre 0,05 m et 0,5 m, soit la profondeur des blocs.

Les résultats présentés dans les figures 5.8-b et 5.9-b indiquent que les intervalles $[f_{\min}, f_{\max}]$ sont similaires. Il semble que les vitesses représentatives du milieu de propagation correspondent aux fréquences qui contiennent une énergie significative. En effet, on constate que les fréquences pour lesquelles les variations de la vitesse sont faibles ont généralement des amplitudes de spectre supérieures à 20% de l'amplitude maximale. Il est donc possible de sélectionner une bande de fréquence qui permettrait de caractériser le milieu de propagation.

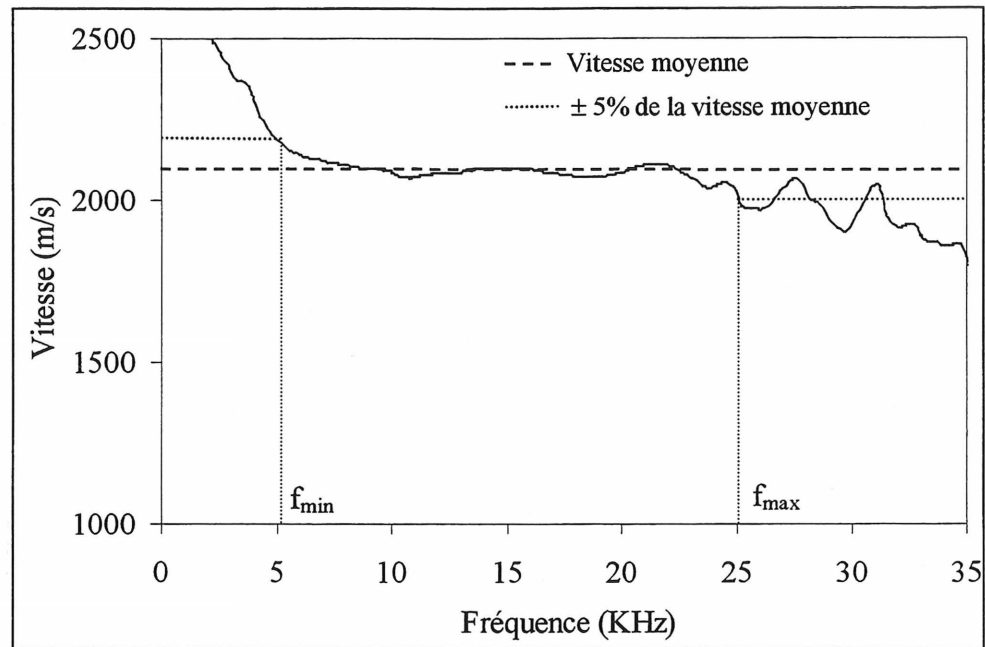


(a) sélection des fréquences f_{\min} et f_{\max} sur un spectre d'amplitude

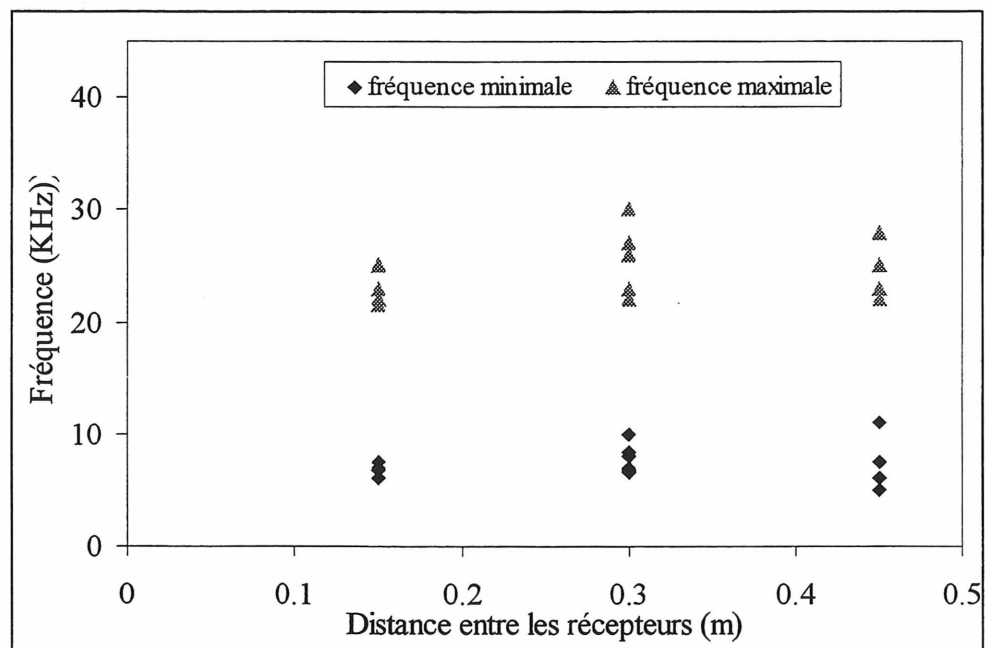


(b) valeurs moyennes de f_{\min} et f_{\max} pour les trois distances considérées (0,15 m, 0,30 m et 0,45 m) et pour les trois blocs homogènes

Figure 5.8 Sélection des fréquences dont l'amplitude est supérieure à 20 % de l'amplitude maximale du spectre d'amplitude



(a) sélection des fréquences f_{\min} et f_{\max} sur une courbe de vitesse versus fréquence



(b) valeurs moyennes de f_{\min} et f_{\max} pour les trois distances considérées (0,15 m, 0,30 m et 0,45 m) et pour les trois blocs homogènes

Figure 5.9 Sélection des fréquences pour lesquelles la variation de la vitesse relativement à la vitesse moyenne est inférieure à 5%

Ce critère de sélection de la bande de fréquence, et par conséquent des longueurs d'onde, est essentiellement fonction de la source utilisée. En fait, l'énergie contenue dans le spectre d'amplitude est représentative des ondes générées par la source. D'autre part, pour élargir la bande de longueur d'onde sélectionnée vers de plus grandes longueurs d'ondes, il suffit d'utiliser une source qui génère des ondes basses fréquences sans avoir à déplacer les récepteurs.

Concernant la validité du critère, celui-ci a été défini à la suite d'essais réalisés sur trois qualités de béton, avec la même source et en considérant différentes distances entre les récepteurs. Il semble que le critère est indépendant de la qualité du béton et de la disposition des récepteurs. C'est pour toutes ces raisons que le critère a été adopté pour l'ensemble des essais effectués en laboratoire.

5.1.4. Procédure de traitement de données pour l'analyse spectrale des ondes de surface

Nous avons vu que les résultats des premiers essais réalisés en laboratoire ont permis de développer différentes fenêtres pour filtrer les signaux et d'établir un critère de sélection des longueurs d'ondes. Afin de considérer ces développements dans l'application de la technique, une procédure de traitement des données a été mise au point. C'est cette procédure qui a été utilisée pour tous les essais réalisés au laboratoire. D'autre part, le logiciel *SASW* a été réalisé en se basant sur cette procédure. Il permet l'utilisation des trois fenêtres (*exponentielle modifiée*, *Kaiser* et *multiplication du signal par lui-même*) ainsi que du critère de sélection discuté plus haut.

La procédure comprend quatre étapes. Dans une première étape les mouvements de particules à la surface du béton sont enregistrés sous forme de signaux. La deuxième permet d'éliminer les réflexions contenues dans les signaux. Pour la troisième étape, le spectre de phase est calculé. Le spectre d'amplitude est également déterminé afin de sélectionner la bande de fréquence. Quant à la quatrième et dernière étape, elle concerne la construction de la courbe de dispersion en considérant les longueurs d'ondes sélectionnées. Ces différentes étapes sont résumées sur la figure 5.10

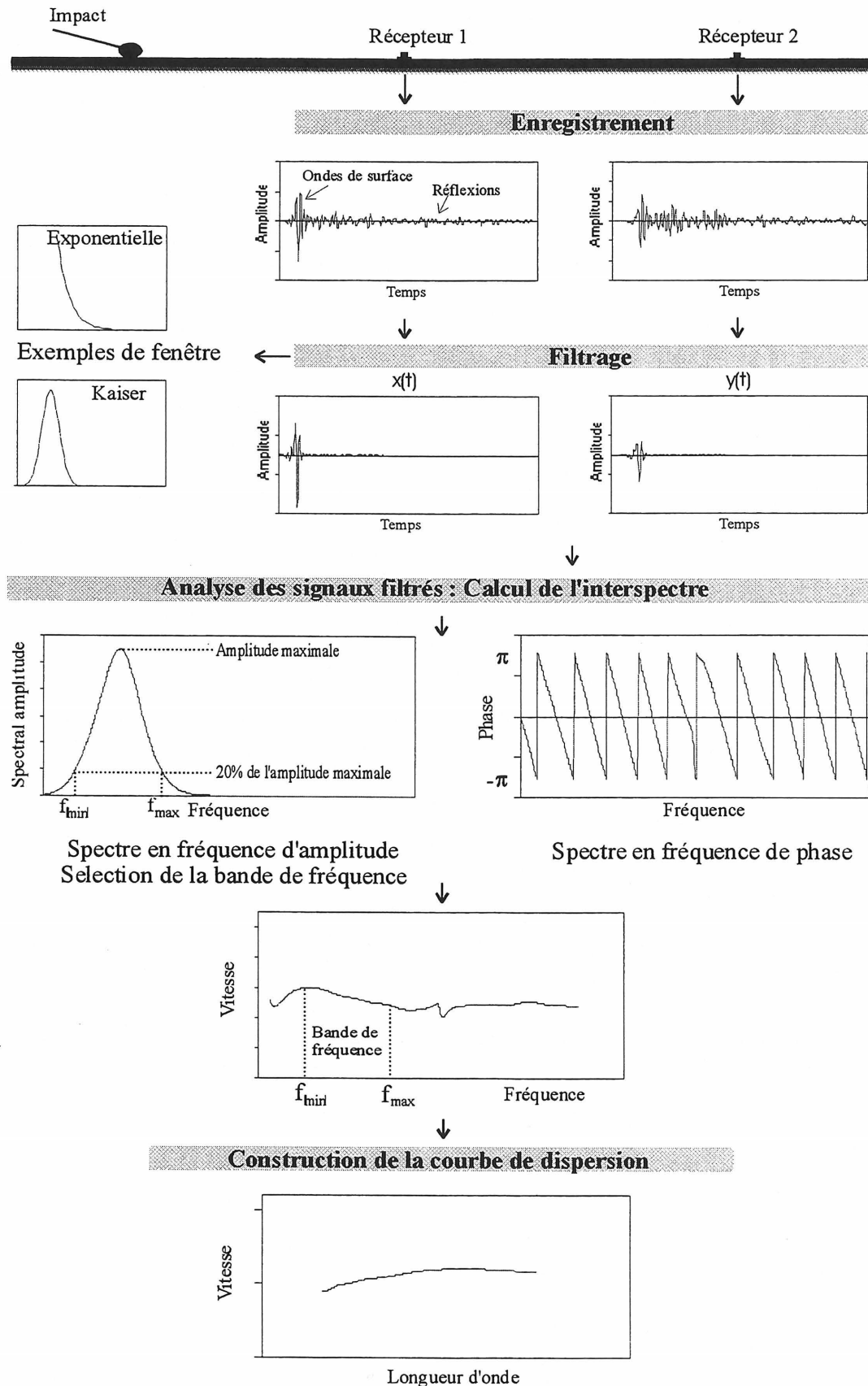


Figure 5.10 Procédure de traitement des données

5.2. Résultats relatifs aux blocs homogènes

Cette section est consacrée à la présentation et à l'analyse des résultats des essais d'analyse spectrale des ondes de surface et des essais soniques réalisés sur les trois blocs homogènes.

Les courbes de dispersion obtenues pour les blocs 1, 2 et 3 sont données sur la figure 5.11. Ces courbes ont été obtenues avec une distance source-récepteur égale à 0,45 m et en ne considérant que les longueurs d'onde comprises entre 0,05 m et 0,3 m. Cet intervalle de longueurs d'onde a été limité par le critère de sélection discuté précédemment. La *configuration de mesure 1* ainsi que la bille C ont été utilisées lors de ces essais.

Lors du traitement des données, les trois fenêtres "*exponentielle modifiée*" (expo), *Kaiser* (kaiser) et *multiplication du signal par lui-même* (**5, pour $n=5$) ont été utilisées. Les trois types de filtres ont donné des courbes de dispersion semblables. En effet, si nous considérons le cas du bloc 1 par exemple (Figure 5.11), les courbes de dispersion associées aux fenêtres *exponentielle modifiée* et *Kaiser* sont identiques sur presque tout l'intervalle de longueurs d'onde considéré. Les fenêtres *Kaiser* et *multiplication du signal par lui-même* donnent aussi la même courbe de dispersion dans le cas du bloc 2. Par conséquent, l'usage de n'importe laquelle des trois fenêtres ne semble pas affecter les résultats. D'autre part, étant donné que les ondes directes de volume ne sont pas atténuées par la fenêtre *exponentielle modifiée*, il apparaît que ces ondes n'ont pas une grande influence sur les résultats. L'opérateur peut donc disposer de trois fenêtres et choisir celle qui lui semble la plus efficace. Par exemple, il est préférable d'utiliser la fenêtre *Kaiser* lorsque l'allure du train d'onde de Rayleigh est en forme de cloche. Quant à la fenêtre *exponentielle modifiée*, elle s'apprête mieux à un train d'onde de Rayleigh qui s'atténue de manière exponentielle. Néanmoins, il est préférable de comparer les courbes de dispersions obtenues avec deux fenêtres afin de s'assurer du résultat.

La figure 5.11 montre également que les courbes de dispersion associées aux trois blocs sont distinctes et reflètent les différentes qualités des trois bétons. Les vitesses de propagation moyennes mesurées sur les blocs 1, 2 et 3 sont respectivement de l'ordre de 1900 m/s, 2100 m/s et 2350 m/s. Ces résultats montrent qu'il est possible d'associer une vitesse de propagation des ondes de Rayleigh à une qualité donnée de béton. Ainsi, une vitesse de 1900 m/s environ et moins correspond à un béton de mauvaise qualité alors qu'un béton de bonne qualité est

caractérisé par une vitesse supérieure à 2300 m/s environ. Quant au béton de qualité moyenne, la vitesse de propagation s'approche de 2100 m/s environ.

Les courbes de dispersion indiquent que la vitesse des ondes de Rayleigh augmente linéairement avec la longueur d'onde. Théoriquement, cette augmentation exprime une amélioration des propriétés mécaniques de la surface vers la base des blocs. L'approximation linéaire de ces courbes (Figure 5.11) montre que la variation la plus importante de la vitesse est observée dans le cas du bloc 1 alors qu'elle est relativement faible dans le cas du bloc 3. Ceci peut s'expliquer par le fait que le béton du bloc 1 est caractérisé par un important rapport eau/ciment (0,8) et qu'il est plus affecté par la ségrégation. Quant à la variation de la vitesse dans le cas du béton 2, elle se situe entre celles des bétons 1 et 3. Dans ce cas, la technique est donc sensible à la qualité du béton ainsi qu'à sa ségrégation.

Si l'on compare les vitesses moyennes mesurées avec les modules d'élasticité statique des trois bétons (tableau 5.1), on constate que le contraste des vitesses entre les trois bétons traduit la même variation de module. En effet, le module et la vitesse du béton de qualité moyenne augmentent respectivement de 6 GPa et de 200 m/s relativement au béton de mauvaise qualité. Il en est de même entre les bétons de bonne qualité et de qualité moyenne.

L'augmentation de la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh entre les trois blocs a été confirmée par des essais soniques réalisés sur les modèles expérimentaux à différentes profondeurs (Figure 5.12). Les résultats des essais soniques indiquent également que la variation de la vitesse de propagation des ondes P dans la direction de la profondeur est plus importante dans le cas du bloc 1. Par conséquent, les ondes P et les ondes de Rayleigh sont sensibles à la ségrégation du béton. Cependant les ondes de Rayleigh sont plus sensibles à la variation de la qualité du béton puisque la vitesse des ondes de Rayleigh augmente de plus de 10 % entre le béton 1 et 2 alors que celle des ondes P n'augmente que de 7,5 %. Il en est de même pour les béton 2 et 3 où la vitesse des ondes de Rayleigh croît de 12 % et celle des ondes P d'à peine 6 %.

Concernant les vitesses de propagation des ondes P dans les trois bétons, elles sont de l'ordre de 3950 m/s pour le béton de mauvaise qualité, de 4250 m/s pour le béton de qualité moyenne et de 4500 m/s pour le béton à haute performance (BHP). Le gradient de vitesse entre les trois bétons est identique et il est de 250 m/s environ.

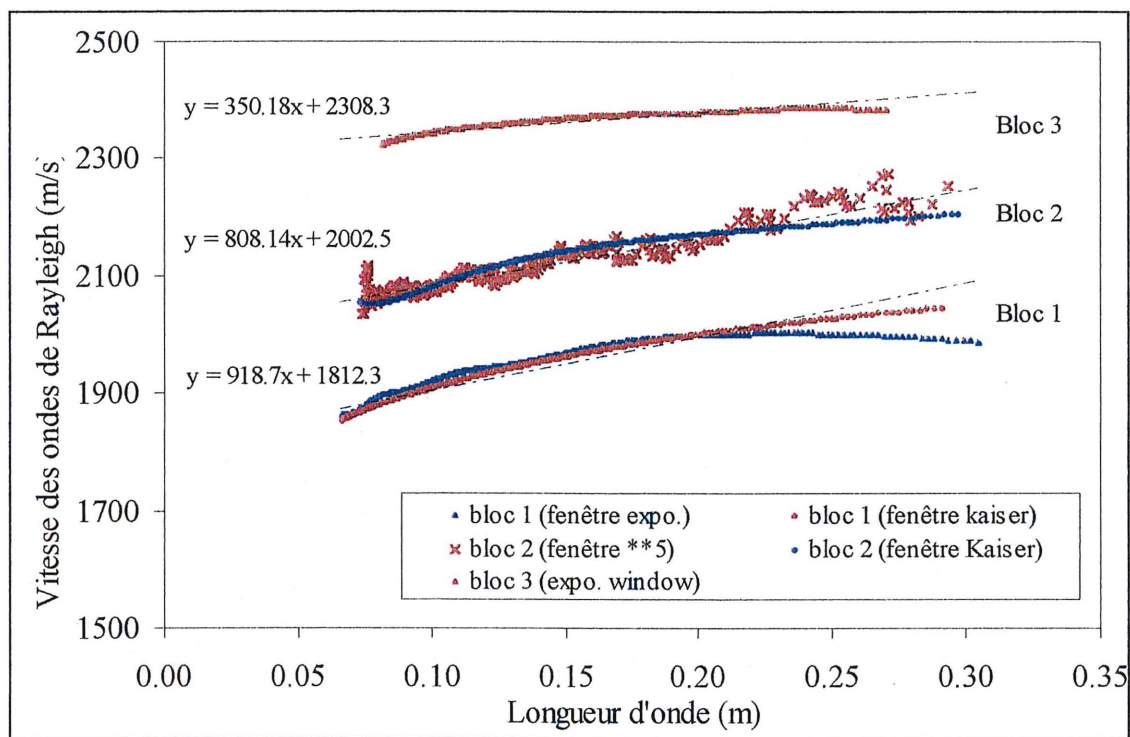


Figure 5.11 Courbes de dispersion obtenues pour les blocs 1, 2 et 3

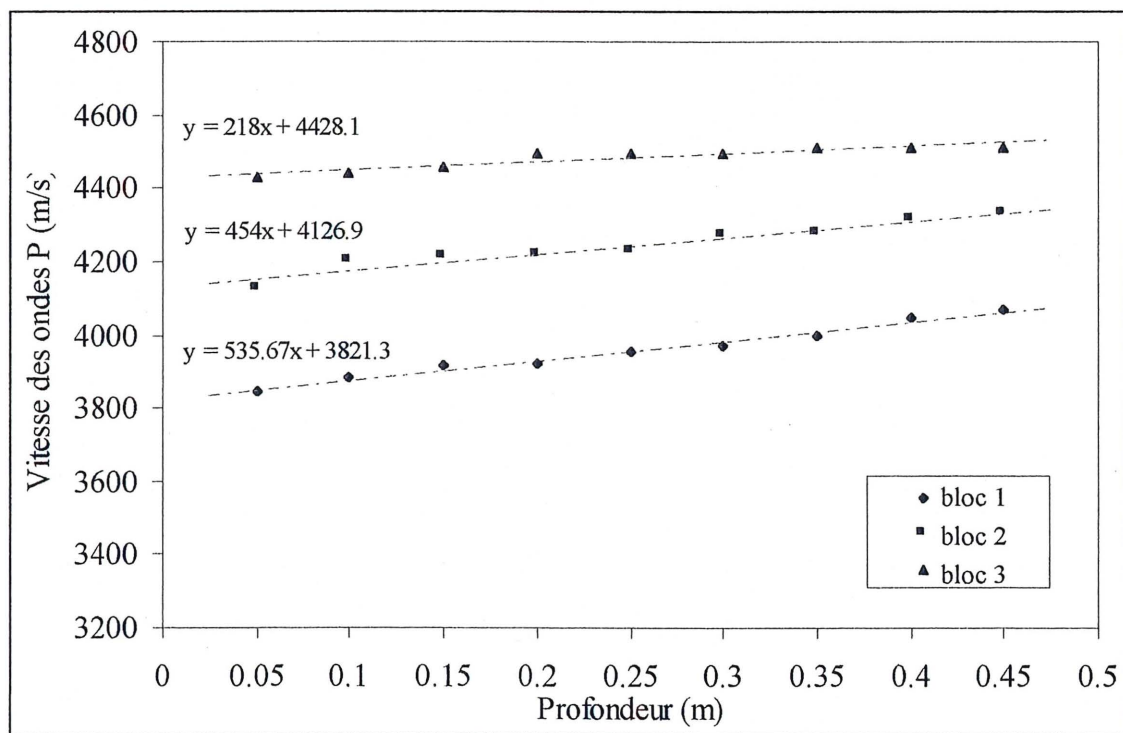


Figure 5.12 Variation de la vitesse des ondes P avec la profondeur pour les bétons 1, 2 et 3

Tableau 5.1 Caractéristiques dynamiques des bétons utilisés

	Bloc 1	Bloc 2	Bloc 3
Vitesse des ondes P (m/s)	3950	4250	4500
Vitesse des ondes de Rayleigh (m/s)	1900	2100	2350
Module d'élasticité dynamique (GPa)	22.6*	29.0*	37.8*
	22.4 ⁽¹⁾	29.0 ⁽²⁾	38.1 ⁽³⁾
<i>Module d'élasticité statique (GPa)</i>	<i>24.0</i>	<i>30.0</i>	<i>36.0</i>

* $\nu = 0.22$, ⁽¹⁾ $\nu = 0.20$, ⁽²⁾ $\nu = 0.22$, ⁽³⁾ $\nu = 0.24$

Le module d'élasticité dynamique (E_d) relatif à chacun des bétons étudiés a également été obtenu en utilisant les vitesses moyennes des ondes de Rayleigh (Tableau 5.1) ainsi que les équations (3-3) et (3-4). Les modules ont été calculés en considérant les coefficients de Poisson respectifs des trois bétons. Néanmoins, les modules ont été calculés une seconde fois en prenant un coefficient de Poisson de 0,22 pour les trois bétons. Ce cas a été étudié afin de comparer les résultats et estimer si les modules dynamiques de bétons de différentes qualités pouvaient être évalués à partir des vitesses des ondes de Rayleigh et d'une seule valeur de coefficient de Poisson.

Les différences entre E_d et le module d'élasticité statique (E_s) des bétons 1, 2 et 3 sont respectivement 6,7%, 3,3% et 7,9%. Dans le cas où un coefficient de Poisson (ν) égal à 0.22 pour les trois bétons serait considéré, cette différence serait de l'ordre de 5.8%, 3.3% et 7.1% pour les bétons 1, 2 et 3. Par conséquent, il est possible d'estimer le module d'élasticité du béton à partir de la vitesse des ondes de Rayleigh. Dans le cas où le coefficient de Poisson du béton ne serait pas connu, il est également possible de considérer une valeur de 0,22. Celle ci correspond à la valeur moyenne du coefficient de Poisson du béton.

5.3. Résultats relatifs au bloc multicouche

L'objectif des essais réalisés sur le bloc multicouche est d'étudier les possibilités de la technique d'ASOS à définir les limites entre des bétons de qualités distinctes. Les résultats de ces essais pour une distance source-récepteur de 0.45 m (*configuration de mesure 1*) sont donnés dans la figure 5.13. Les longueurs d'onde considérées dans ce cas varient de 0,07 mètre à 0,55 mètre. Cet intervalle a été limité par le critère de sélection des fréquences, et par conséquent par la source (bille C).

L'analyse de ces résultats montre que la courbe de dispersion présente une partie linéaire entre 0,07 m et approximativement 0,15 mètre. Ces longueurs d'onde correspondent à une propagation des ondes de Rayleigh avec une vitesse de l'ordre de 2010 m/s dans la couche superficielle (épaisseur : 0,15 mètre). Cette vitesse est légèrement supérieure à celle déterminée dans le bloc 1 (1900 m/s). Une explication serait que dans le cas du bloc 1, la ségrégation est plus importante à cause de la grande profondeur du bloc (0,5 m). Par contre, dans le bloc multicouche, la faible épaisseur de la couche 1, relativement au bloc 1, a permis d'obtenir un béton plus compact.

Pour les longueurs d'onde supérieures à 0,15 m, la courbe de dispersion augmente pour atteindre une vitesse de l'ordre de 2060 m/s. La courbe permet de délimiter clairement la frontière entre les couches 1 et 2. Cela montre que les ondes de Rayleigh sont sensibles aux contrastes de qualité du béton. D'autre part, la longueur d'onde de 0,15 m correspond à la profondeur de la première couche. Il semble donc que la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh est affectée par les propriétés du béton sur une profondeur équivalente à une longueur d'onde. Par conséquent, il est possible d'assimiler la longueur d'onde à la profondeur dans le béton et d'évaluer l'épaisseur du béton de surface lorsque celui-ci est détérioré.

La vitesse de propagation des ondes de Rayleigh pour les longueurs d'ondes comprises entre 0,15 m et 0,35 m croît de 2010 m/s pour se stabiliser à 2060 m/s environ. Cette vitesse est atteinte par les longueurs d'ondes supérieures à 0,2 m. Cela est dû au fait que les vitesses de ces ondes sont influencées par les caractéristiques des bétons 1 et 2. On constate que la pente de la courbe augmente également pour des longueurs d'ondes supérieures à 0,35 m et donc pour les ondes qui se propagent dans les trois couches de béton. Cela confirme que la profondeur des propriétés qui influencent la propagation des ondes de Rayleigh est de l'ordre de la longueur d'onde.

Toutefois l'augmentation de la vitesse dans la troisième couche est linéaire relativement à la partie de la courbe de dispersion correspondant à la seconde couche. Ce résultat ne peut pas être expliqué par la différence des contrastes des propriétés mécaniques entre d'une part les couches 1 et 2 et d'autre part celui des couches 2 et 3. Ces contrastes sont en fait semblables (Tableau 5.1). Ce résultat est dû au fait que les longueurs d'onde qui sont suffisamment grandes pour atteindre la troisième couche (> 35 centimètres) contiennent des informations sur les trois couches. La vitesse des ondes de Rayleigh calculée est une vitesse moyenne qui prend en considération les caractéristiques des trois couches.

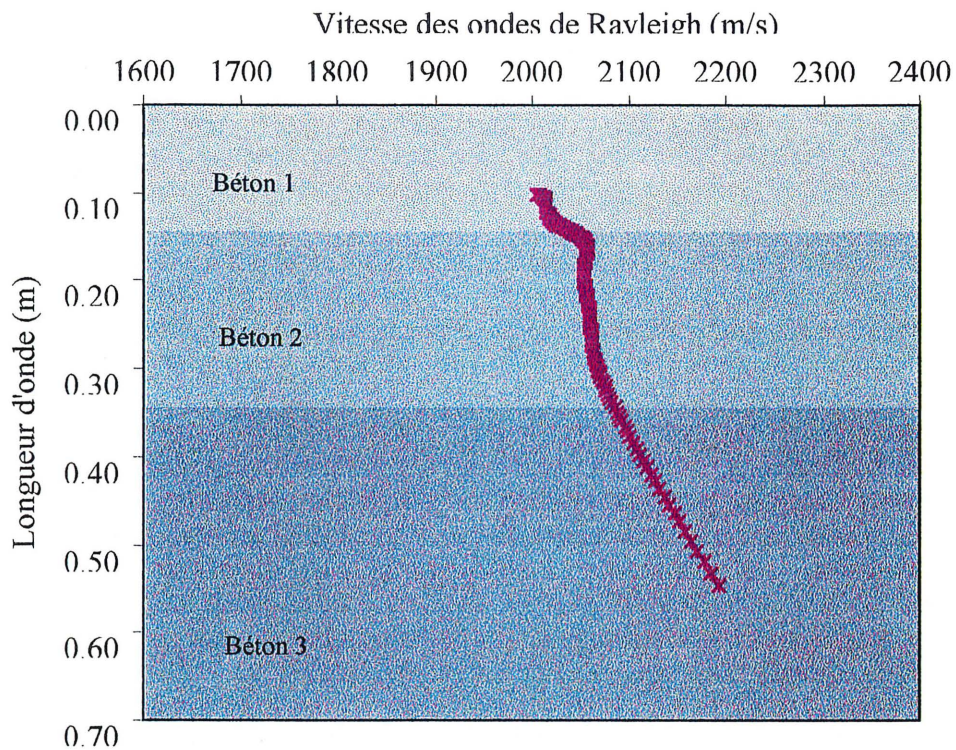


Figure 5.13 Courbe de dispersion obtenue sur le cube multicouche (mesures faites en surface)

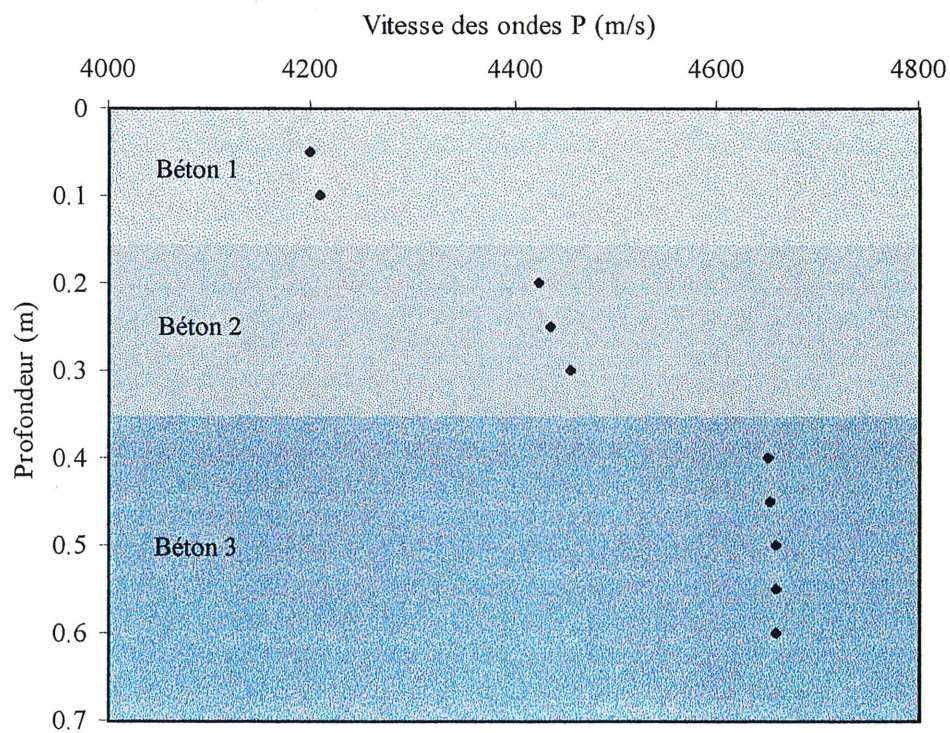


Figure 5.14 Variation de la vitesse des ondes P avec la profondeur pour le bloc multicouche (mesures faites sur les cotés)

Les résultats des essais soniques réalisés sur le bloc multicouche confirment l'augmentation de la qualité du béton en fonction de la profondeur (Figure 5.14). Les vitesses obtenues sont de 4200 m/s environ pour la couche 1, 4450 m/s pour la couche 2 et de 4650 m/s pour la couche 3. Ces vitesses sont plus élevées que celles déterminées sur les blocs homogènes 1, 2 et 3. Comme pour la vitesse des ondes de Rayleigh, l'augmentation des vitesses de propagation des ondes P dans le bloc multicouche relativement aux blocs homogènes est probablement due à la faible épaisseur des couches et par conséquent à une meilleure compaction et à une faible ségrégation du béton.

Les mesures des vitesses des ondes P ont été effectuées à différentes profondeurs ce qui a nécessité l'accès à deux cotés du bloc, alors que la courbe de dispersion a été obtenue à partir d'un seul essai réalisé à la surface du bloc. Par conséquent, l'ASOS s'avère pertinente que l'essai sonique pour détecter la détérioration du béton de surface ainsi que son étendue en profondeur. Toutefois, lorsque cela est possible, il est utile de réaliser des essais soniques pour évaluer la qualité du béton sur une plus grande profondeur.

5.4. Influence des paramètres d'essai

La technique d'ASOS a été utilisée en modifiant certains paramètres d'essai afin d'étudier leur influence sur les résultats. Les paramètres considérés sont la distance RR , la distance SR et le type de source. Cette section est consacrée à la présentation et à l'analyse des résultats de cette étude.

5.4.1. Distance entre récepteurs

Les résultats des essais réalisés sur les blocs homogènes et multicouche sont présentés sur les figures 5.15, 5.16, 5.17 et 5.18. Ces essais ont été effectués en considérant la *configuration de mesure 1* et trois distances RR , soit 15 cm, 30 cm et 45 cm.

Dans l'ensemble, l'allure des courbes de dispersion n'est pas affectée par la distance RR . En effet, les vitesses ont des variations similaires pour des distances RR différentes. Si l'on considère le béton 1 (Figure 5.15), les vitesses pour des distances RR de 15 cm, 30 cm et 45 cm varient respectivement entre 1930 m/s et 2040 m/s, 1940 m/s et 2035 m/s et entre 1870 m/s et 2010 m/s.

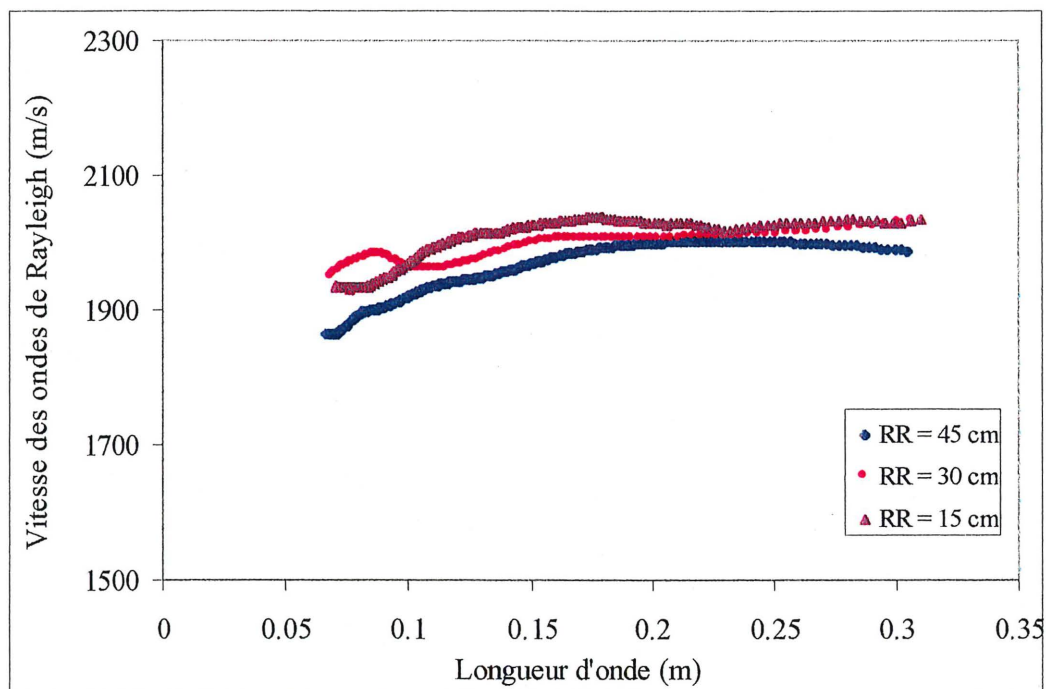


Figure 5.15 Influence de la distance RR pour le béton 1

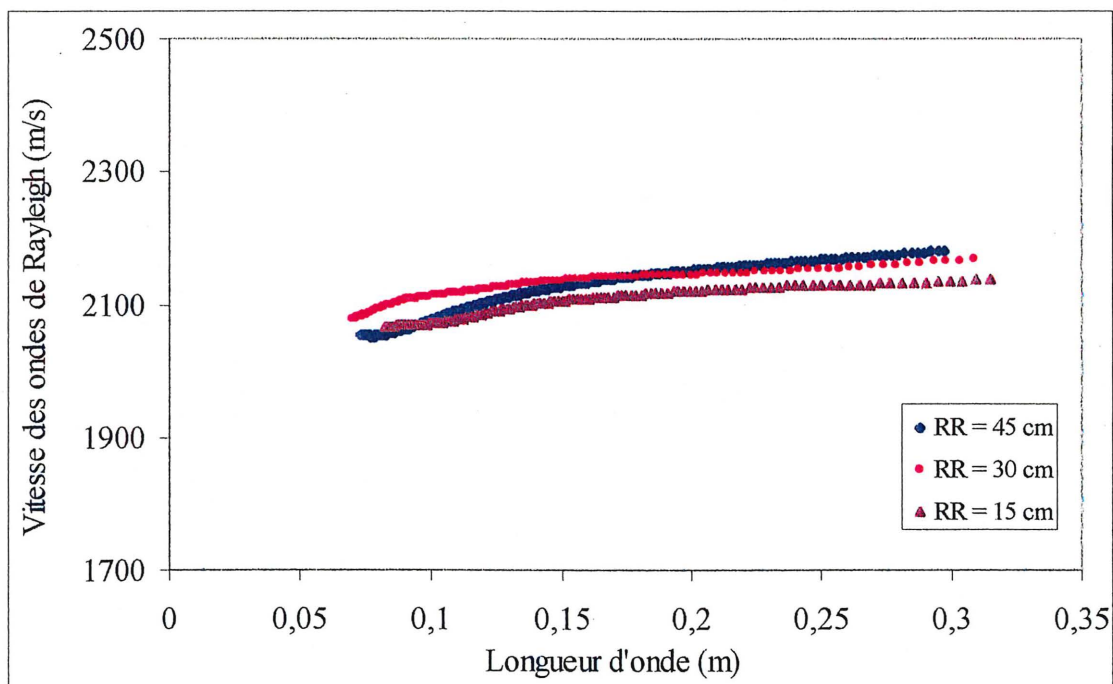


Figure 5.16 Influence de la distance RR pour le béton 2

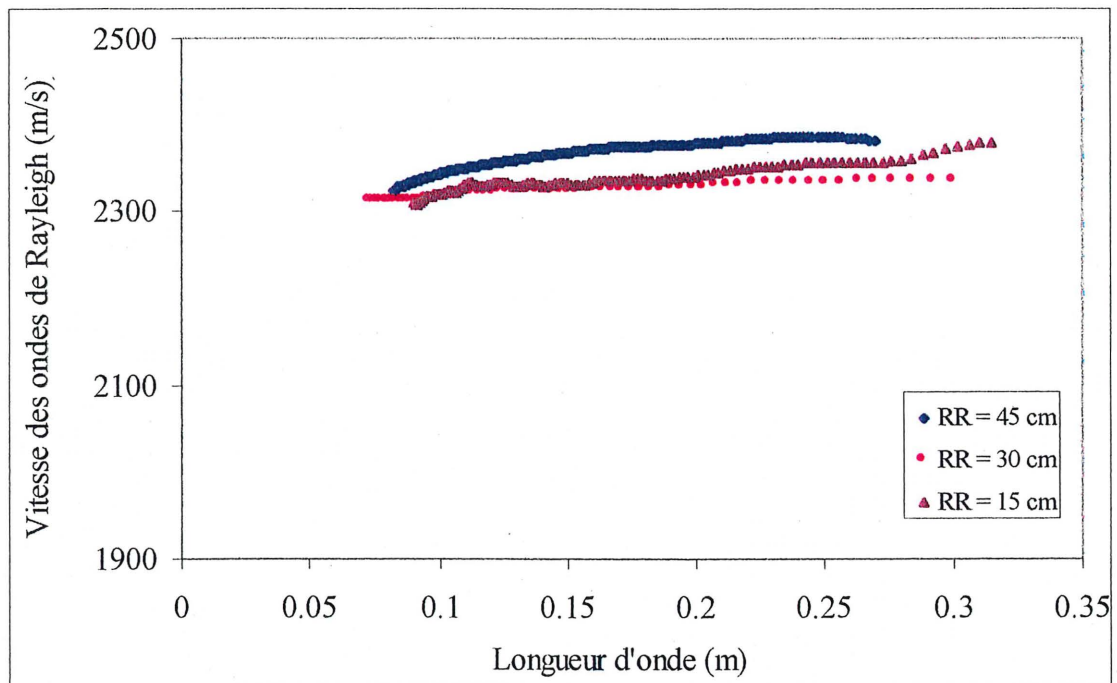


Figure 5.17 Influence de la distance RR pour le béton 3

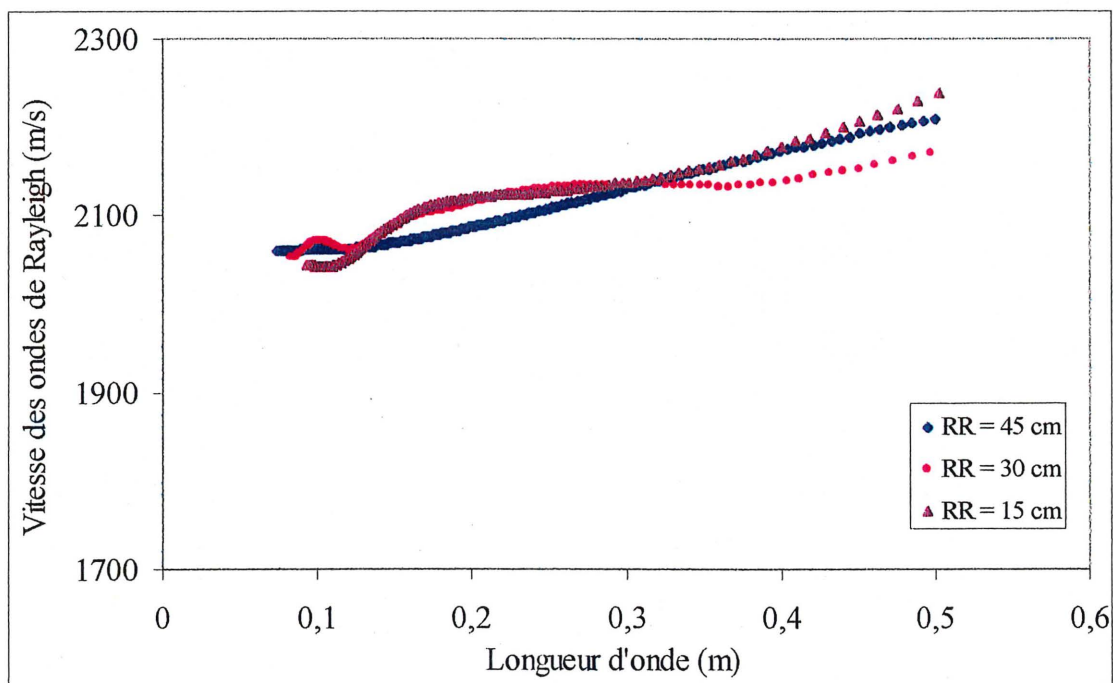


Figure 5.18 Influence de la distance RR pour le bloc multicouche

Quant aux vitesses moyennes obtenues sur le béton 1, elles sont de 1960 m/s, 1950 m/s et 1900 m/s pour des distances RR de 15 cm, 30 cm et 45 cm. Ces vitesses moyennes sont du même ordre de grandeur et reflètent les faibles propriétés mécaniques du béton 1 (tableau 4.1). Aussi, les intervalles de longueur d'onde considérés sont similaires pour les trois distances, ce qui indique que la source est le principal paramètre qui influe sur la bande de fréquence sélectionnée, et par conséquent sur les longueurs d'ondes sélectionnées.

Les courbes de dispersion obtenues sur le béton 2 concernent un même intervalle de longueur d'onde qui est compris entre 7 cm et 32 cm. La figure 5.16 montre que les vitesses de propagation des ondes de Rayleigh pour des distances RR de 15 cm, 30 cm et 45 cm varient respectivement entre 2060 m/s et 2140 m/s, 2080 m/s et 2170 m/s et entre 2050 m/s et 2200 m/s. Ce qui donne des vitesses moyennes de l'ordre de 2090 m/s, 2110 m/s et 2100 m/s pour les distances RR de 15 cm, 30 cm et 45 cm. La différence entre ces trois vitesses est de l'ordre de 10 m/s et elle est minime.

Concernant le béton 3, les trois courbes de dispersion indiquent que les vitesses varient très peu selon la longueur d'onde et que les vitesses moyennes s'approchent de 2350 m/s (Figure 5.17). Ces observations montrent que le bloc 3 est constitué d'un béton de bonne qualité et que sa ségrégation est très faible. Les vitesses obtenues pour les trois distances 15 cm, 30 cm et 45 cm varient respectivement de 2310 m/s à 2380 m/s, de 2320 m/s à 2350 m/s et de 2320 m/s à 2390 m/s. Ces variations sont effectivement très faibles et confirment l'homogénéité du bloc de béton dans le sens de la profondeur.

Comme pour les trois blocs 1, 2 et 3, les résultats des essais réalisés sur le bloc multicouche (Figure 5.18) montrent que l'allure des courbes de dispersion est très peu influencée par la distance RR . La courbe correspondant à la distance RR de 15 cm indique que la vitesse des ondes de Rayleigh est de 2040 m/s environ pour des longueurs d'ondes inférieures à 15 cm. Pour des longueurs d'ondes supérieures à 15 cm la vitesse augmente brusquement, ce qui correspond à une amélioration de la qualité du milieu à partir d'une profondeur équivalente à la longueur d'onde de 15 cm. Étant donné que la profondeur de la seconde couche est de 15 cm, il apparaît que la profondeur des propriétés du béton qui influence la propagation des ondes de Rayleigh est bien de l'ordre de la longueur d'onde, et ce indépendamment de la distance RR .

Les résultats de ces essais montrent que la distance RR a peu d'influence sur l'allure et les vitesses moyennes des courbes de dispersion dans le cas où le milieu de propagation serait homogène ou multicouche. Ces observations permettent de confirmer que les résultats des essais sont indépendants de la distance RR . Notons toutefois que cette distance devrait avoir une influence sur les vitesses de propagation dans le cas où le milieu de propagation ne serait pas homogène dans la direction de propagation des ondes (parallèlement à la surface). Effectivement, si une fissure s'interposait entre les deux récepteurs, elle aurait un effet sur la vitesse de propagation des ondes et son influence sera inversement proportionnelle à la distance RR . Ce phénomène sera traité plus en détail dans la section consacrée à l'étude des discontinuités.

En conclusion, il est possible de réaliser des essais d'ASOS sur le béton en considérant une distance RR en fonction des objectifs recherchés. Une distance importante aura toutefois pour effet d'atténuer fortement la part d'énergie des ondes de Rayleigh et donc de diminuer le rapport signal sur bruit. Par conséquent, il est préférable, lorsque cela est possible, de considérer une distance RR inférieure à 50 cm. D'autre part, une faible distance RR permettra à l'utilisateur de la technique de caractériser l'état du béton sur un faible espace et une distance plus grande permettra d'avoir une évaluation globale du béton qui concernerait un plus grand espace.

5.4.2. Distance source-premier récepteur

Les essais ont été réalisés sur les cubes homogènes et multicouche en adoptant la *configuration de mesure 2*, la bille C et une distance RR de 30 cm. Plusieurs distances SR ont été considérées, soit 0 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm et 40 cm. Notons que la distance SR de 0 cm correspond au cas où la source serait appliquée près du premier récepteur.

Les résultats de ces essais sont présentés sur les figures 5.19, 5.20, 5.21 et 5.22. On constate que, pour un même bloc, les courbes de dispersion ont une allure similaire. Toutefois les valeurs des vitesses moyennes semblent augmenter légèrement selon la distance SR . Dans le cas du béton 1, les vitesses moyennes pour les distances SR de 0 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm et 40 cm sont respectivement de l'ordre de 1870 m/s, 1940 m/s, 1970 m/s, 1910 m/s et 1960 m/s. La vitesse la plus faible est obtenue pour une distance SR nulle. Toutefois, la différence entre les vitesses la plus faible et la plus importante est d'à peine 100 m/s. Notons aussi que les bandes de longueurs d'ondes sélectionnées pour les différentes distances SR sont similaires. En effet, les longueurs

d'ondes pour les distances SR de 0 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm et 40 cm sont respectivement comprises entre 8,5 cm et 31 cm, 9 cm et 30 cm, 9,5 cm et 31 cm, 7,5 cm et 29 cm et entre 9 et 31 cm. Ces observations montrent que le critère de sélection n'est pas influencé par la distance source-premier récepteur et qu'il est indépendant de ce paramètre.

Les courbes de dispersion correspondant au béton 2 sont présentées sur la figure 5.20. Les longueurs d'ondes considérées sont comprises entre 9 cm et 30 cm environ quelle que soit la distance source-premier récepteur. L'allure des courbes est similaire pour les différentes distances SR . Les vitesses moyennes pour les distances SR de 0 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm et 40 cm sont respectivement de 2000 m/s, 2020 m/s, 2040 m/s, 2110 m/s et 2120 m/s. La vitesse la plus faible a été obtenue pour une distance SR de 0 cm et la vitesse la plus élevée pour une distance de 40 cm. L'écart entre ces vitesses est de 100 m/s environ. Ainsi, la distance SR a également une légère influence sur les valeurs moyennes des vitesses de propagation des ondes de Rayleigh sur le béton 2.

Pour le béton 3, les vitesses moyennes varient entre 2310 m/s et 2380 m/s pour des distances SR respectives de 0 cm et 40 cm. Les vitesses moyennes augmentent légèrement avec la distance SR , néanmoins, l'allure des courbes est conservée pour les différentes distances. Quant à la bande de longueur d'onde sélectionnée, elle est comprise entre 7 cm et 31 cm et elle est identique pour les différentes distances sauf pour celle de 20 cm où la longueur d'onde maximale n'est que de 27 cm.

Concernant le cube multicouche, les observations retenues sur les bétons 1, 2 et 3 sont également valables. En effet, l'allure des courbes de dispersion et la bande de longueur d'onde sélectionnée sont similaires pour les distances SR de 0 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm et 40 cm (Figure 5.22). Pour l'ensemble des courbes, on constate que la vitesse de propagation est constante pour les longueurs d'onde inférieures à 15 cm environ alors que la vitesse augmente pour des longueurs d'ondes supérieures. Il est donc possible de distinguer la frontière entre les couches 1 et 2 indépendamment de la distance source-premier récepteur. Notons aussi que les vitesses de propagation augmentent avec la distance source-premier récepteur. Les vitesses les plus faibles et les plus élevées correspondent respectivement à une distance SR de 0 cm et de 40 cm. Toutefois l'écart entre les vitesses est généralement inférieure à 100 m/s.

L'ensemble de ces résultats montre que le critère de sélection des longueurs d'ondes est indépendant du paramètre « distance SR ». D'autre part, lors du traitement des données obtenues sur les blocs homogènes, il est apparu que le critère de sélection donnait des résultats satisfaisants. En effet, on a constaté que les variations de vitesses étaient importantes et injustifiées relativement aux propriétés des blocs concernés (homogène ou multicouche) pour les fréquences non sélectionnées. Cette observation montre que seules les fréquences sélectionnées, et par conséquent les longueurs d'ondes sélectionnées, permettent de rendre compte de la qualité du béton.

Globalement, la distance SR n'a pas modifié l'allure des courbes de dispersion même si les vitesses moyennes augmentent légèrement avec la distance. La vitesse la plus faible étant obtenue pour le cas où la source est appliquée près du premier récepteur. D'après les résultats, il est clair que les cinq distances SR utilisées lors de ces essais permettent de distinguer la qualité des trois bétons. En effet, si l'on considère la distance SR nulle, les vitesses moyennes obtenues pour les bétons 1, 2 et 3 sont distinctes et elles sont respectivement de 1870 m/s, 2000 m/s et 2310 m/s. Aussi, pour le bloc multicouche, la distance SR de 0 cm permet de distinguer la limite entre les couches 1 et 2 ainsi qu'entre les couches 2 et 3, même si cette dernière est moins nette que la première.

La diminution de la vitesse des ondes de Rayleigh pour de faibles distances SR est probablement due à l'interférence des ondes de Rayleigh avec les ondes de volume. Dans le cadre d'une étude réalisée sur des chaussées, Hiltunen et Woods (1992) ont également constaté une variation de la vitesse des ondes de Rayleigh pour de faibles distances SR . Ce résultat avait suggéré que l'énergie des ondes de volume était élevée relativement à celle des ondes de Rayleigh pour de faibles distances SR . Ces auteurs ont alors recommandé d'éliminer sur la courbe de dispersion les ondes dont la longueur d'onde excède deux fois la distance SR . Cela revient à dire que pour que l'énergie des ondes de volume soit insignifiante et que l'onde puisse être assimilée à une onde plane de Rayleigh il faut que l'onde se propage en faisant au moins un demi cycle. Dans le cadre de cette étude, il semble que seules les vitesses moyennes sont légèrement affectées par la distance SR et que l'allure des courbes de dispersion est conservée quelle que soit la distance SR . Il n'est donc pas nécessaire d'éliminer certaines longueurs d'onde afin de construire la courbe de

dispersion et évaluer la variation de la qualité du béton en fonction de la profondeur ou relativement à un autre béton.

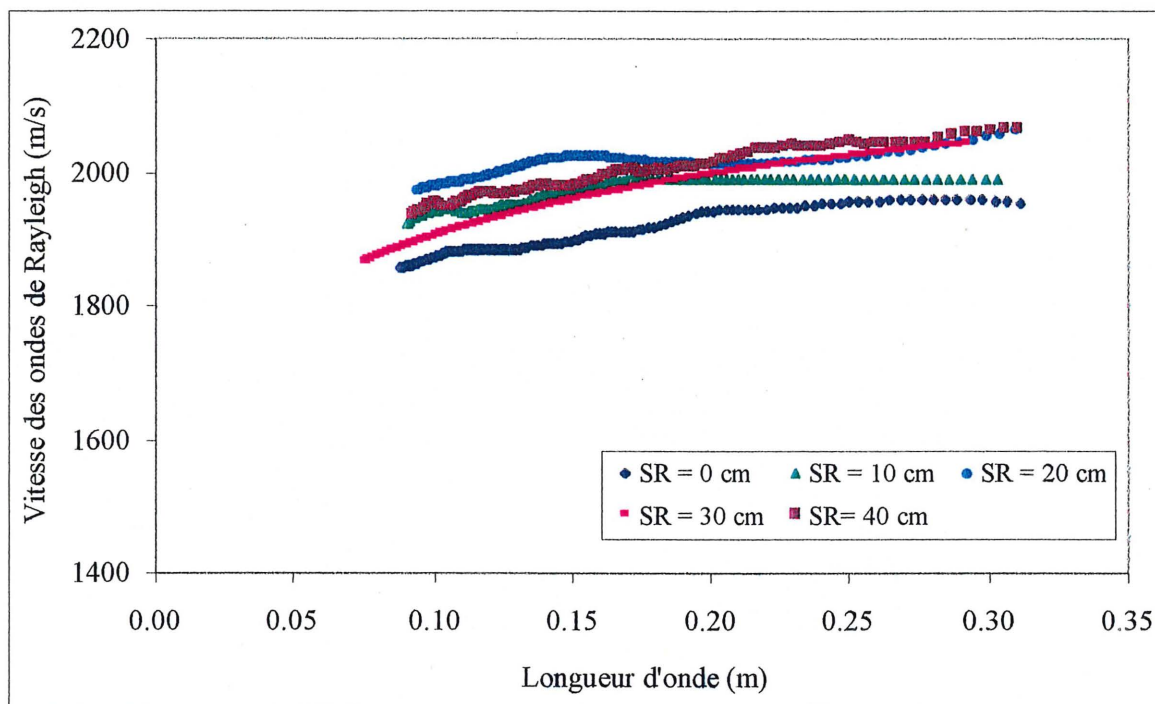


Figure 5.19 Influence de la distance SR sur le béton 1

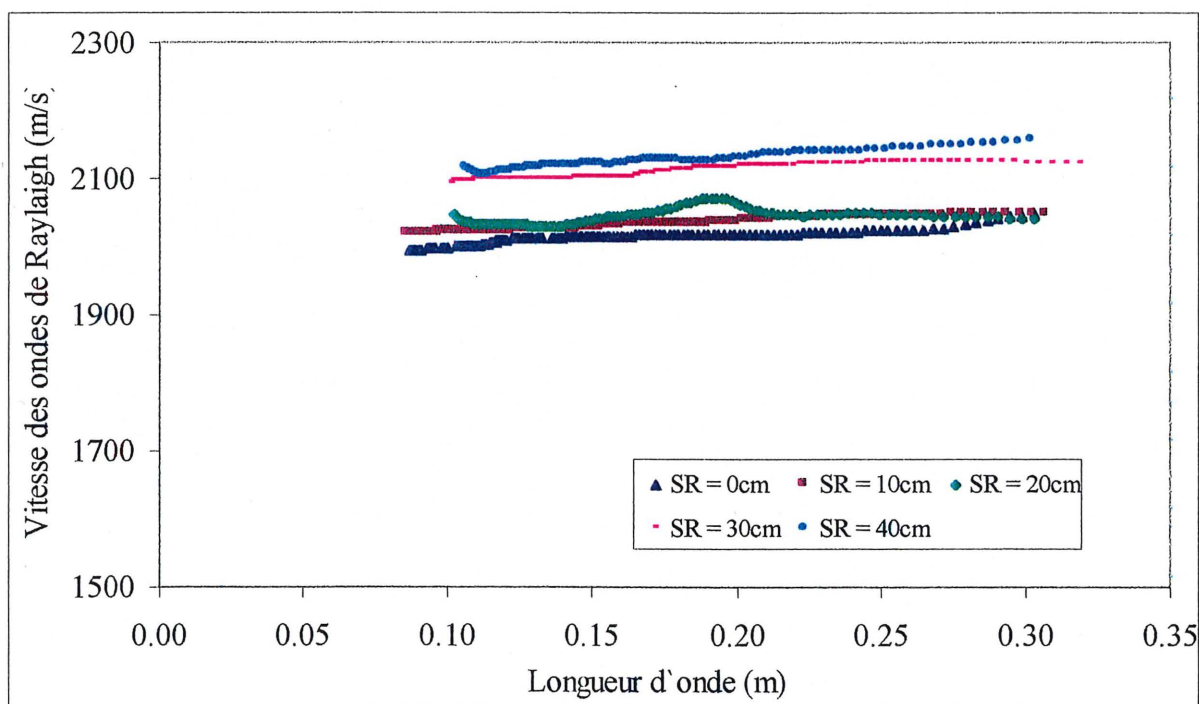


Figure 5.20 Influence de la distance SR sur le béton 2

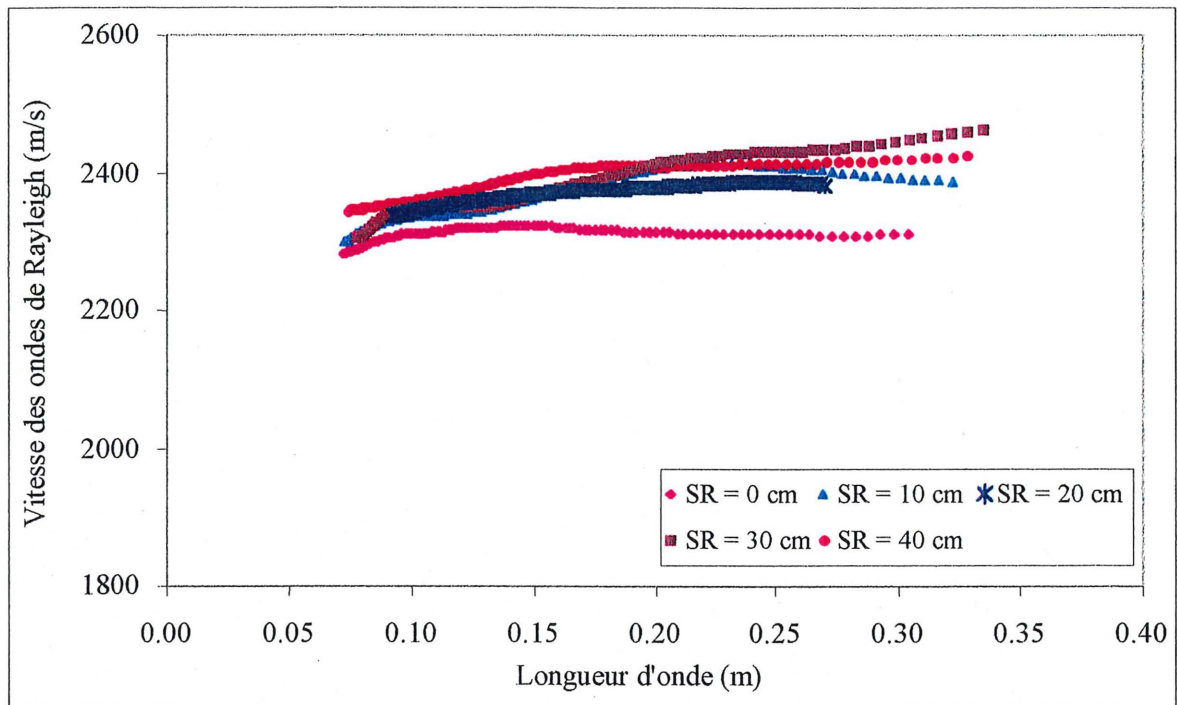


Figure 5.21 Influence de la distance SR sur le béton 3

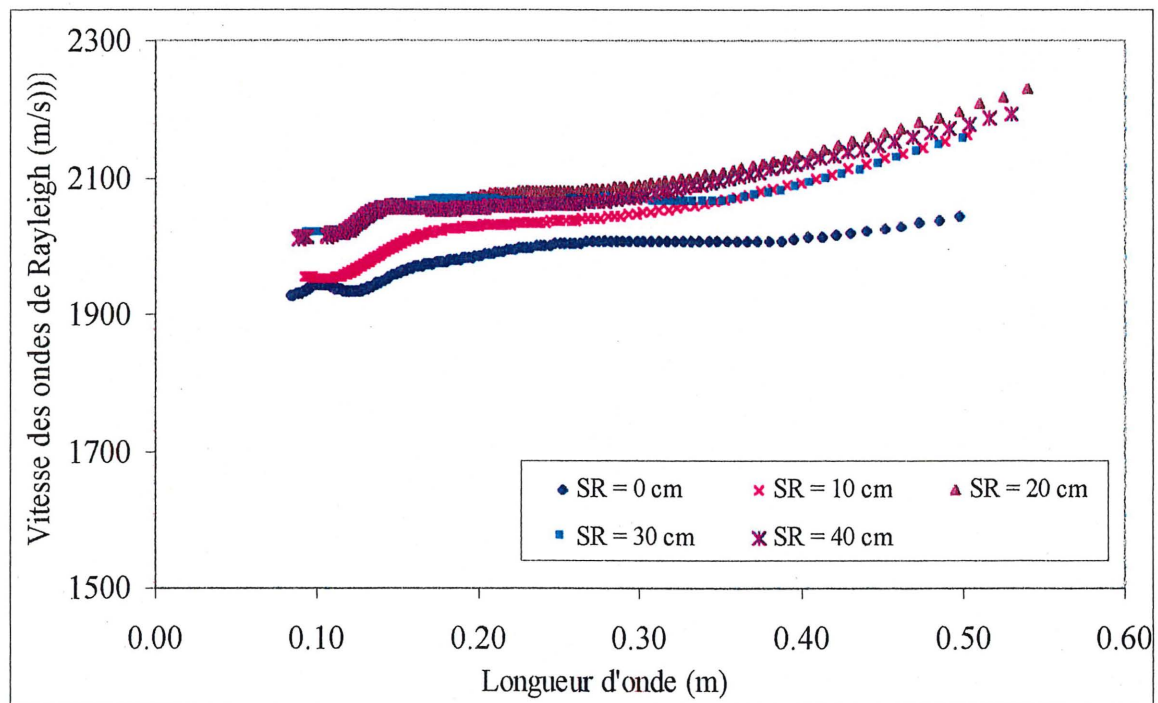


Figure 5.22 Influence de la distance SR sur le bloc multicouche

En conclusion, il apparaît qu'il est possible d'évaluer la qualité du béton en utilisant une distance SR différente de la distance RR . Par contre, il est important de comparer les résultats obtenues sur les différents blocs ou bétons en considérant une même distance SR . Les vitesses seront alors relatives à la distance source-premier récepteur donnée.

Quant à l'allure des courbes de dispersion et donc à la variation de la qualité du béton selon le sens de la profondeur, elle est indépendante de la distance SR . L'utilisateur de la technique peut donc réaliser ses essais en considérant une distance SR de 0 cm. L'avantage de cette démarche est qu'il est possible d'obtenir plusieurs courbes de dispersion à partir d'une seule position de la source et du premier récepteur et en utilisant plusieurs « deuxième récepteur ».

Pour illustrer cela, considérant la configuration de mesure présentée dans la figure 5.23. Dans ce cas, la source est appliquée près du premier récepteur ($SR=0$ cm) alors que trois autres récepteurs sont disposés le long d'une ligne. Par conséquent les ondes générées par la source se propagent à partir de la position du premier récepteur et dans toutes les directions, notamment vers les récepteurs 2, 3 et 4. Il suffit alors d'enregistrer les mouvements de particules avec les quatre récepteurs et de traiter les données en considérant trois paires de signaux, soit celles enregistrées par les récepteurs 1 et 2, 1 et 3 et enfin 1 et 4. Le traitement de ces trois paires de signaux permettra d'obtenir trois courbes de dispersion et donc de caractériser le béton entre les récepteurs 1 et 2, 1 et 3 et enfin 1 et 4. Cela permet d'évaluer la qualité du béton suivant plusieurs directions et sur une plus grande étendue sans avoir à déplacer la source et les récepteurs.

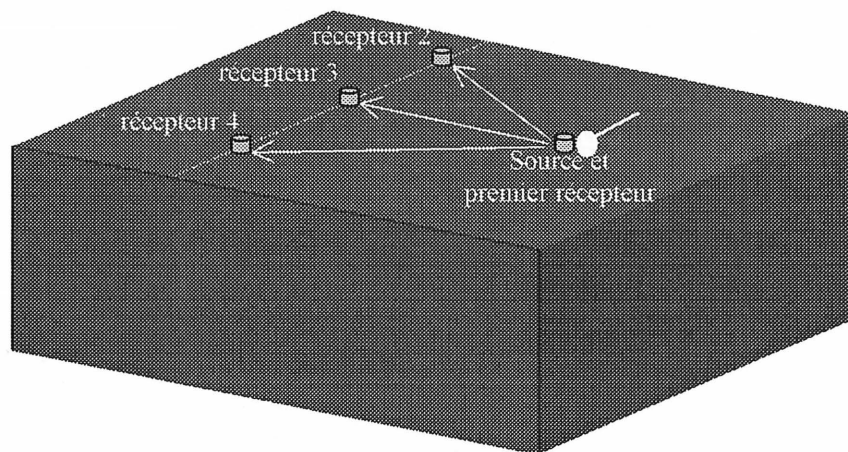


Figure 5.23 Configuration de mesure pour une distance source-premier récepteur de 0 cm

5.4.3. Type de source

Les essais ont été réalisés sur les blocs homogènes et multicouche en adoptant la *configuration de mesure 1*, une distance *RR* de 30 cm et différentes sources soit les billes A ($\phi=6$ mm), B ($\phi=8$ mm), C ($\phi=13$ mm), et D ($\phi=19$ mm), le marteau et le transducteur piézo-électrique.

Les résultats des essais réalisés avec les billes et le marteau sont présentés sur les figures 5.24, 5.25, 5.26 et 5.27. De manière générale, l'allure des courbes de dispersion est indépendante de la source. Par contre, les longueurs d'ondes sélectionnées semblent augmenter avec le diamètre des billes.

La figure 5.24 relative au béton 1 indique que les vitesses moyennes des ondes de Rayleigh pour les billes A, B, C, D et le marteau sont respectivement de 1940 m/s, 1970 m/s, 1950 m/s, 1930 m/s et 1990 m/s. Ces vitesses sont de l'ordre de 1950 m/s et sont représentatives des faibles propriétés mécaniques du béton 1. Quant aux bandes de longueurs d'onde sélectionnées pour ces mêmes sources, elles sont comprises respectivement entre 7 cm - 18 cm, 7 cm - 22 cm, 7 cm - 31 cm, 9,5 cm - 40 cm et enfin entre 16,5 cm - 45 cm. Les billes A et B génèrent des ondes de caractéristiques fréquentielles comparables. La longueur d'onde la plus courte ($\lambda=7$ cm) est atteinte par les billes A, B et C alors que la plus grande longueur d'onde est donnée par le marteau. Ces résultats confirment ceux de Hiltunen et Woods (1992) pour lesquels une source volumineuse a tendance à générer des ondes basses fréquences et par conséquent des ondes de grandes longueurs d'onde. Par contre, une source de faible volume permet de générer des ondes hautes fréquences et donc de faibles longueurs d'onde. Aussi, il apparaît que certaines sources sont complémentaires au niveau des longueurs d'onde. Il faut alors essayer de combiner la bande de longueur d'onde sélectionnée pour une source de faible volume avec celle d'une autre source de plus grand volume afin de disposer d'une large bande de longueur d'onde. Pour le béton 1, il est préférable de considérer les longueurs d'onde générées par la bille C et le marteau pour obtenir une bande de longueur d'onde comprises entre 7 cm et 45 cm. En effet, les billes A et B n'apportent pas d'informations supplémentaires relativement à la bille C.

Concernant le béton 2, les résultats sont donnés sur la figure 5.25. Les vitesses moyennes de propagation des ondes de Rayleigh sont similaires et varient entre 2100 m/s et 2140 m/s pour respectivement la bille A et le marteau. Les longueurs d'ondes sélectionnées pour les billes A, B,

C, D et le marteau sont comprises respectivement entre 9,5 cm - 21 cm, 8,5 cm - 20 cm, 7 cm - 31 cm, 9,5 cm - 33 cm et entre 10 cm - 41 cm. La longueur d'onde la plus faible est obtenue avec la bille C et la plus grande longueur d'onde correspond toujours au marteau. Comme pour le béton 1, dans le cas du béton 2 il est préférable de combiner les longueurs d'onde générées par la bille C et le marteau pour disposer d'une bande de longueur d'onde comprises entre 7 cm - 41 cm.

La figure 5.26 illustre les résultats obtenus sur le béton 3 avec les billes A, B, C, D et le marteau. Les courbes sont similaires et les vitesses moyennes pour ces sources sont respectivement de 2320 m/s, 2300 m/s, 2330 m/s, 2360 m/s et 2345 m/s. Ceci montre que la source n'a pas d'influence sur la vitesse moyenne de propagation des ondes de Rayleigh. La bande de longueur d'onde considérée est similaire pour les billes A et B (7 cm à 26 cm). Il en est de même avec les billes C et D pour lesquelles les longueurs d'ondes sont comprises entre 7 cm - 32 cm. Quant au marteau, son complément d'informations sur les grandes longueurs d'onde est minime comparativement aux billes C et D puisqu'il n'atteint qu'une longueur d'onde de 36 cm. Notons aussi, que les billes A et B n'apportent pas d'informations supplémentaires relativement aux billes C et D. Il semble donc que pour le béton 3 la source la plus appropriée soit la bille C.

En conclusion aux essais réalisés avec les billes et le marteau sur les blocs homogènes, il apparaît que l'utilisation des billes A et B n'est pas justifiée. En effet, la bille C atteint généralement des longueurs d'ondes aussi courtes que les billes de faibles diamètres : A et B. Par contre, dans certains cas, il peut être utile de combiner deux sources afin de considérer une large bande de longueur d'onde. Ces deux sources sont la bille C et le marteau. Ce résultat rejoint celui de Hiltunen et Woods (1992) qui à la suite d'une étude sur des chaussées recommande de combiner les courbes de dispersion obtenues avec deux sources de différents poids afin de considérer une large bande de longueur d'onde.

Les essais réalisés sur les blocs homogènes ont également été effectués sur le bloc multicouche. Par contre, seuls les billes C et D et le marteau ont été utilisés. Les résultats sont donnés dans la figure 5.27. Les courbes de dispersion sont similaires. Les longueurs d'onde sélectionnées pour les billes C et D et le marteau sont comprises respectivement entre 10 cm - 42 cm, 9 cm - 41 cm et entre 11 cm - 43 cm. Les longueurs d'onde obtenues avec les différentes sources sont comparables. Par conséquent, l'utilisation de bille C sur le bloc multicouche aurait été suffisante.

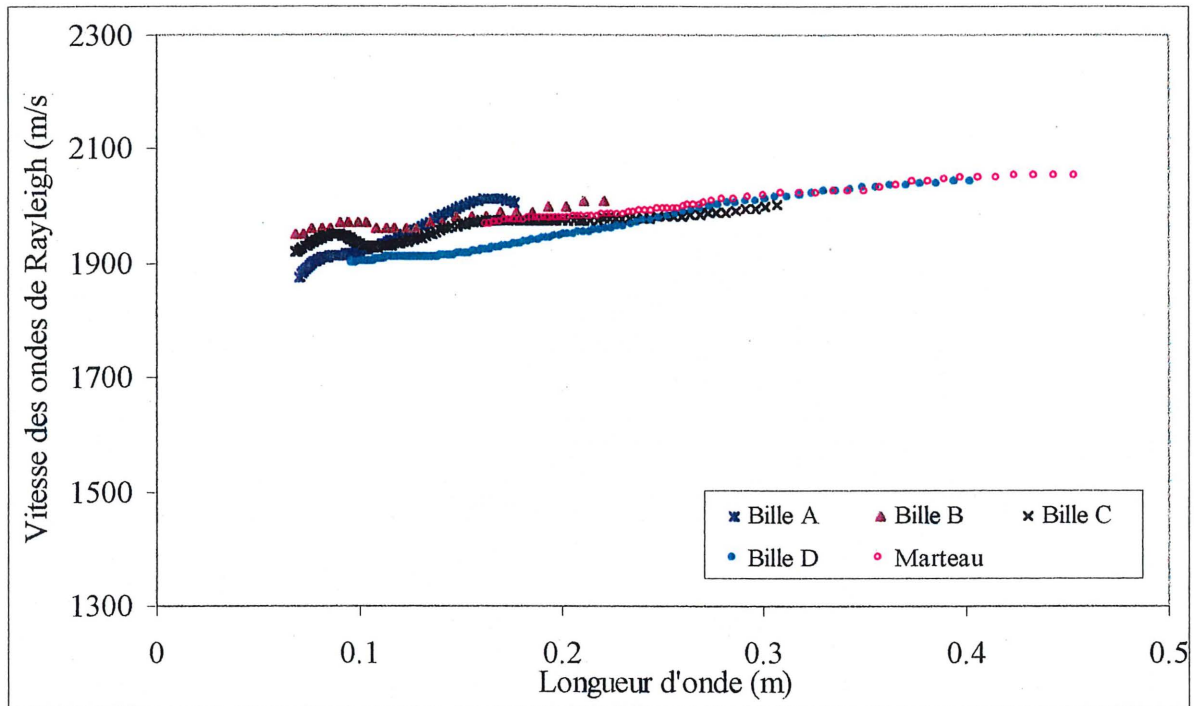


Figure 5.24 Influence de la source sur les courbes de dispersion du béton 1

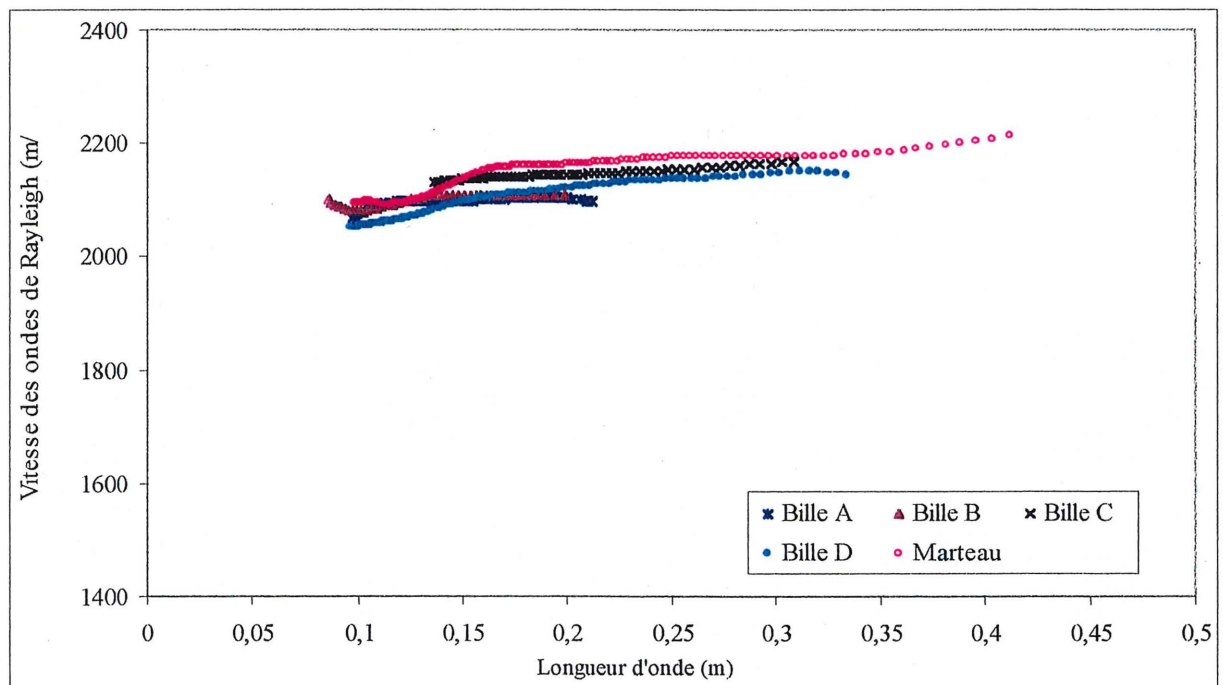


Figure 5.25 Influence de la source sur les courbes de dispersion du béton 2

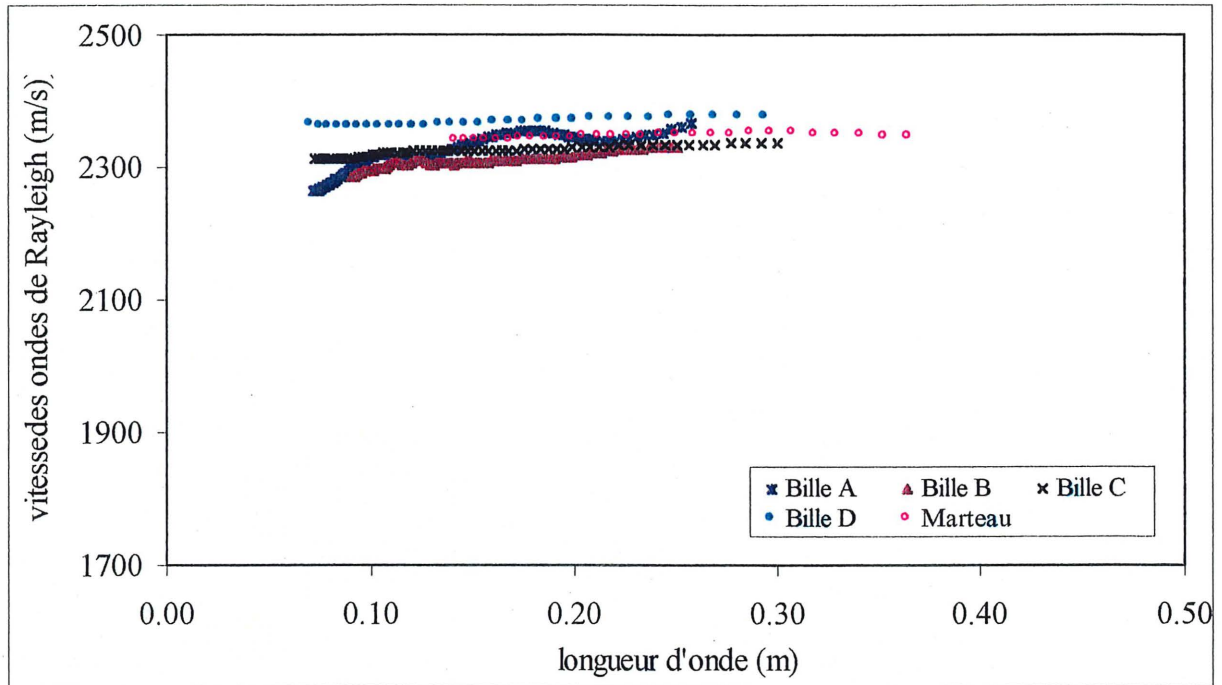


Figure 5.26 Influence de la source sur les courbes de dispersion du béton 3

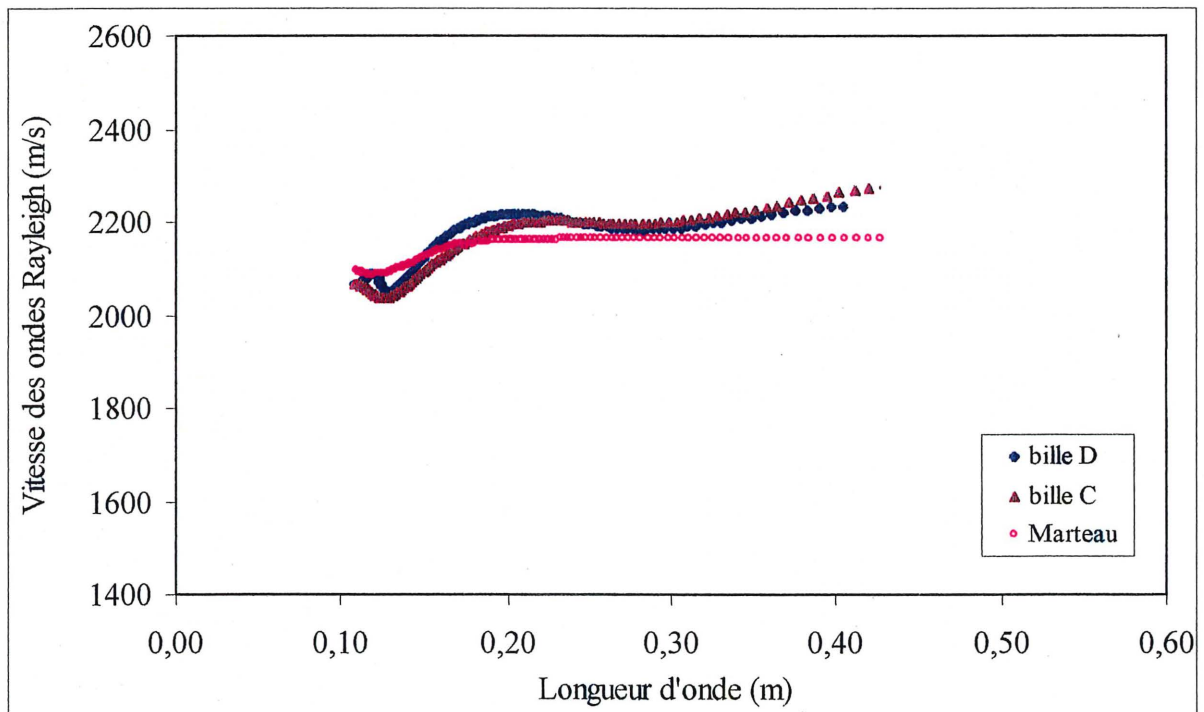


Figure 5.27 Influence de la source sur les courbes de dispersion du bloc multicouche

Globalement, le critère de sélection de longueurs d'onde est dépendant de la source et donc des ondes générées. Aucune source n'a été capable d'atteindre des longueurs d'ondes inférieures à 7 cm, et ce malgré l'utilisation de billes de très faible diamètre. Cela est dû au fait que les faibles longueurs d'onde s'atténuent très rapidement et qu'elles ne peuvent pas atteindre les deux récepteurs avec une énergie supérieure au bruit ambiant. En conséquence, la bille C est la source la plus appropriée pour évaluer la détérioration du béton superficielle pour des longueurs d'ondes supérieures à 7 cm et inférieures à 30 cm environ pour les blocs homogènes et 45 cm pour le bloc multicouche. Toutefois, dans certains cas, il est possible d'utiliser le marteau ou une source de poids supérieure pour obtenir des informations sur de plus grandes longueurs d'onde.

Le transducteur piézo-électrique n'a pas permis d'obtenir des résultats satisfaisants et c'est la raison pour laquelle il n'a pas été considéré dans l'analyse. Le principal inconvénient de cette source est que l'onde émise n'est pas une impulsion et que les signaux enregistrés par les récepteurs sont très difficiles à filtrer à cause du fait que le train d'onde de fortes amplitude contient des ondes de Rayleigh et des réflexions. La figure 5.28 illustre un exemple de signaux enregistrés à la surface du béton 3 en utilisant deux sources : le transducteur et la bille C. Il est clair que lorsque le transducteur est utilisé, il est difficile de discerner les ondes de Rayleigh et donc d'appliquer une fenêtre de sorte à éliminer seulement les réflexions. Les courbes de dispersion obtenues avec le transducteur ne sont pas interprétables comme l'illustre la figure 5.29.

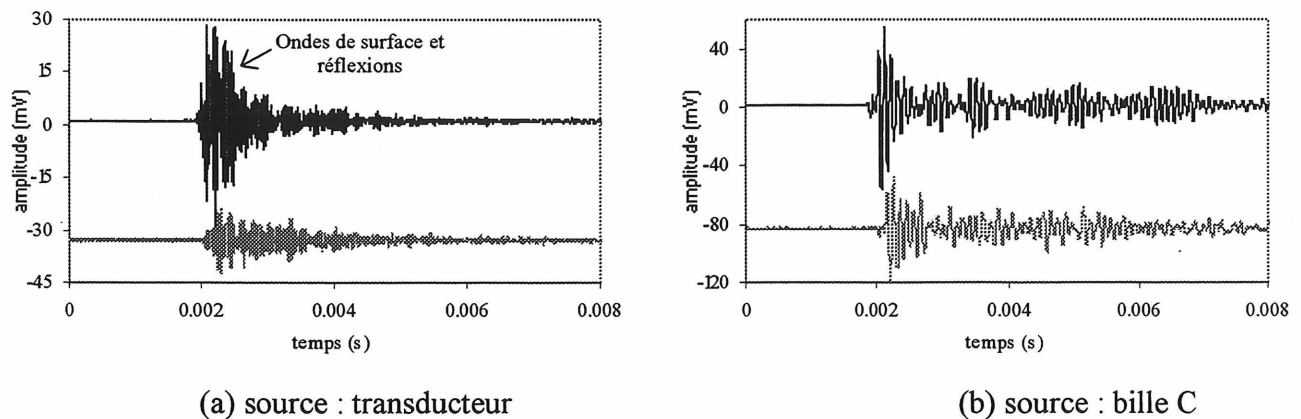


Figure 5.28 Comparaison des signaux obtenus avec 2 sources : transducteur et la bille C

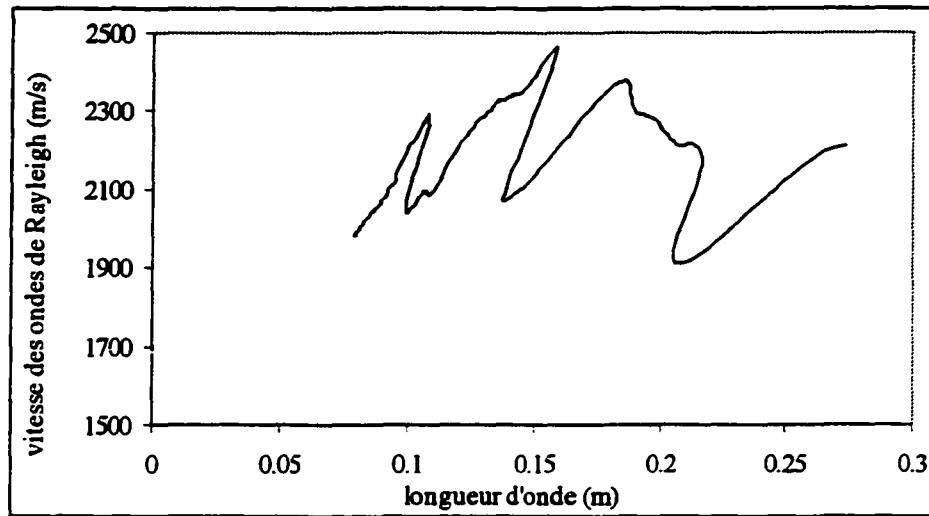


Figure 5.29 Courbe de dispersion obtenue sur le béton 3 avec le transducteur

5.5. Résultats sur les discontinuités

Les figures 5.30, 5.31, 5.32 et 5.33 regroupent les courbes de dispersion obtenues sur les discontinuités verticale 1, verticale 2, verticale 3, horizontale 1 et horizontale 2. Les essais ont été réalisés en considérant trois distances RR de sorte que les récepteurs soient placés symétriquement par rapport à l'axe passant par le centre de la discontinuité. Une courbe de dispersion obtenue sur le béton sans discontinuité ($RR=30$ cm) a également été ajoutée sur les figures afin de mieux voir l'effet des discontinuités. La source utilisée lors de ces essais est la bille C.

5.5.1. Discontinuités verticales

Concernant la discontinuité verticale 1 (Figure 5.30), la vitesse moyenne de propagation des ondes de Rayleigh augmente avec la distance RR . Toutefois, le contraste de vitesse entre les courbes correspondant à $RR = 10$ cm et $RR = 20$ cm est plus important que pour celles obtenues avec des distances RR de 20 cm et 50 cm. L'influence de la discontinuité sur la propagation des ondes est plus importante pour les faibles distances entre récepteurs. En effet, la part du trajet de l'onde à travers la discontinuité augmente lorsque la distance entre les deux récepteurs diminue. C'est pour cette raison que la vitesse est aussi faible pour la distance RR de 10 cm. Toutefois,

notons que la vitesse moyenne pour la distance RR de 50 cm reste sensiblement inférieure à celle obtenue sans discontinuités.

L'allure des courbes est peu affectée par la discontinuité. La vitesse est constante pour de faibles longueurs d'ondes et augmente pour des longueurs d'onde supérieures à 15 cm environ. La vitesse de propagation des ondes de faibles longueurs d'onde est de 1060 m/s, 1470 m/s et 1630 m/s pour des distances RR de 10 cm, 20 cm et 50 cm. Ces observations montrent que les ondes de longueurs d'onde inférieures à 15 cm sont affectées par les propriétés de la discontinuité et de la couche 1. Quant aux ondes de longueurs d'ondes supérieures à 15 cm, leur vitesse de propagation est influencée par les propriétés de la discontinuité et des couches 1 et 2. La présence de la discontinuité près de la surface du béton se manifeste comme si les propriétés de la première couche diminuaient avec la distance RR .

Les courbes de dispersion ne permettent pas d'évaluer l'étendue en profondeur de la discontinuité. La raison est que les ondes de grandes longueurs d'onde ($\lambda > 30$ cm) contiennent des informations sur la discontinuité et les deux couches. Par conséquent la vitesse de ces ondes est une vitesse moyenne qui prend en considération les caractéristiques des deux couches et de la discontinuité. Notons aussi que le bloc multicouche n'est pas le milieu idéal pour évaluer la profondeur de la discontinuité. L'étude s'est limitée à établir l'effet global de la discontinuité sur les courbes de dispersion.

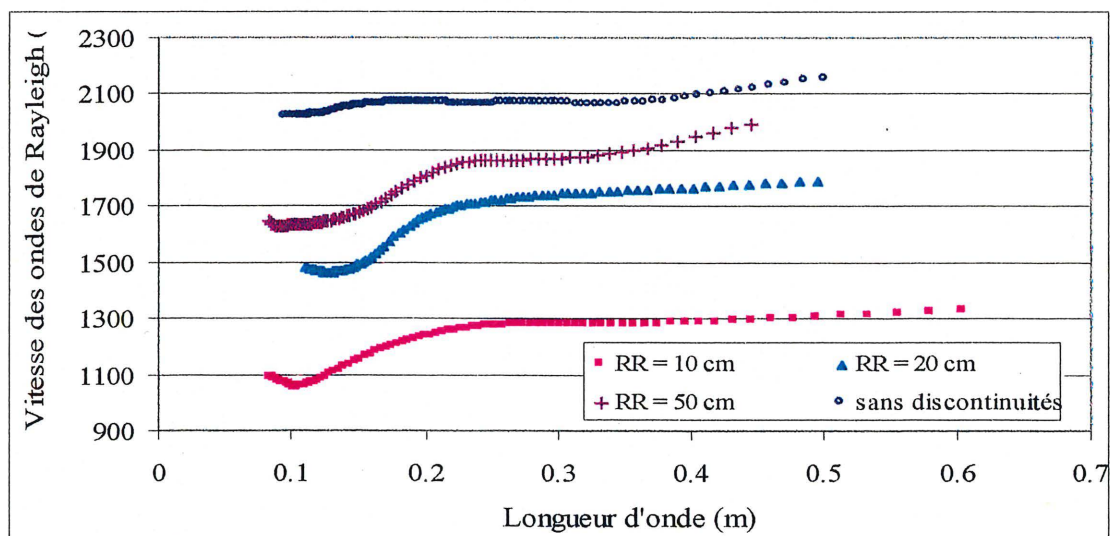


Figure 5.30 Influence de la discontinuité verticale 1 sur les courbes de dispersion

La figure 5.31 montre que la discontinuité verticale 2 a également une influence sur les courbes de dispersion. En effet, la vitesse de propagation des ondes diminue pour des longueurs d'onde supérieures à 12 cm environ, et ce, indépendamment de la distance entre récepteurs. La diminution est cependant très marquée pour $RR=10$ cm. Ce phénomène s'explique par le fait que les grandes longueurs d'onde ($\lambda > 12$ cm) se propagent à travers la couche 1 et la discontinuité. Cependant, la vitesse des ondes de longueurs d'onde supérieures à 15 cm augmente parce qu'elles sont influencées par les propriétés de la couche 1, de la discontinuité et de la couche 2.

L'influence de la discontinuité diminue pour de grandes distances RR . Il est donc possible de détecter la discontinuité verticale 2 en considérant différentes distances entre récepteurs. Par contre, comme pour la discontinuité verticale 1, il n'est pas possible d'évaluer l'étendue en profondeur de la discontinuité à cause du fait que les grandes longueurs d'ondes sont influencées par les propriétés des 3 couches de béton et de la discontinuité.

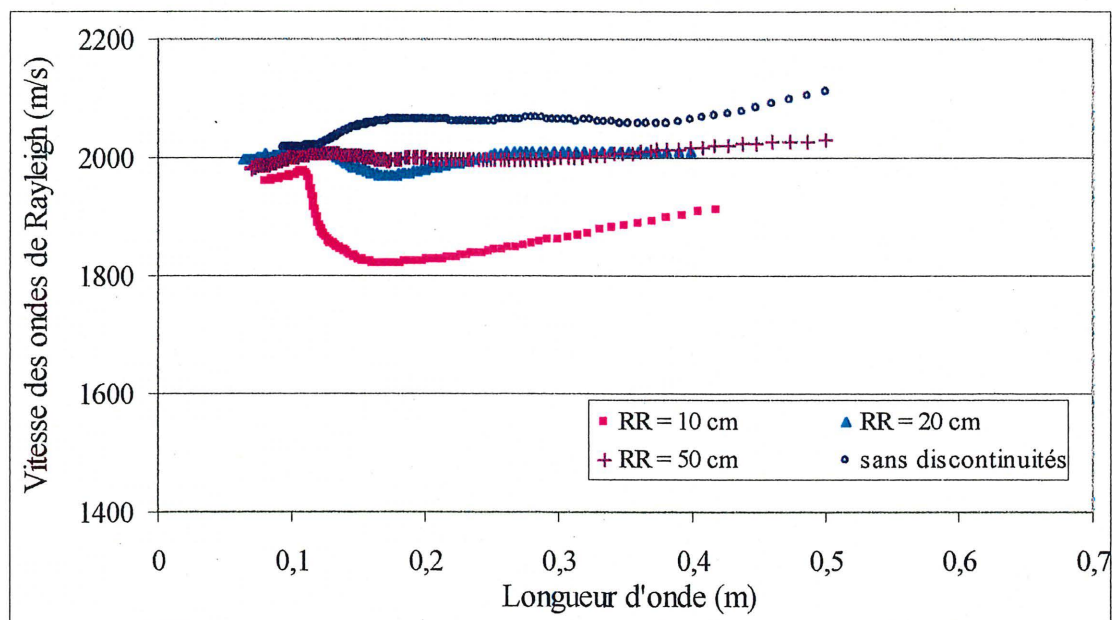


Figure 5.31 Influence de la discontinuité verticale 2 sur les courbes de dispersion

La discontinuité verticale 3 a également pu être détectée à partir des courbes de dispersion (Figure 5.32). La vitesse de propagation des ondes de Rayleigh diminue pour des longueurs d'ondes supérieures à 25 cm environ et donc pour des ondes qui se propagent à travers les couches 1 et 2 et la discontinuité. Toutefois la vitesse de propagation augmente pour des

longueurs d'ondes supérieures à 35 cm environ comme pour la courbe correspondant au béton sans discontinuité. Cette augmentation de vitesse est due au fait que les ondes de grandes longueurs d'onde sont affectées par les trois couches de béton et la discontinuité. On constate également que l'influence de la discontinuité est plus importante pour la distance RR de 10 cm relativement aux autres distances. Cependant, si l'on compare les courbes de dispersion obtenues sur les trois discontinuités verticales et pour une même distance RR de 10 cm, on constate que la diminution de vitesse est moins prononcée lorsque la profondeur de la discontinuité augmente. Cela montre que la propagation des ondes de Rayleigh est plus sensible aux défauts proches de la surface.

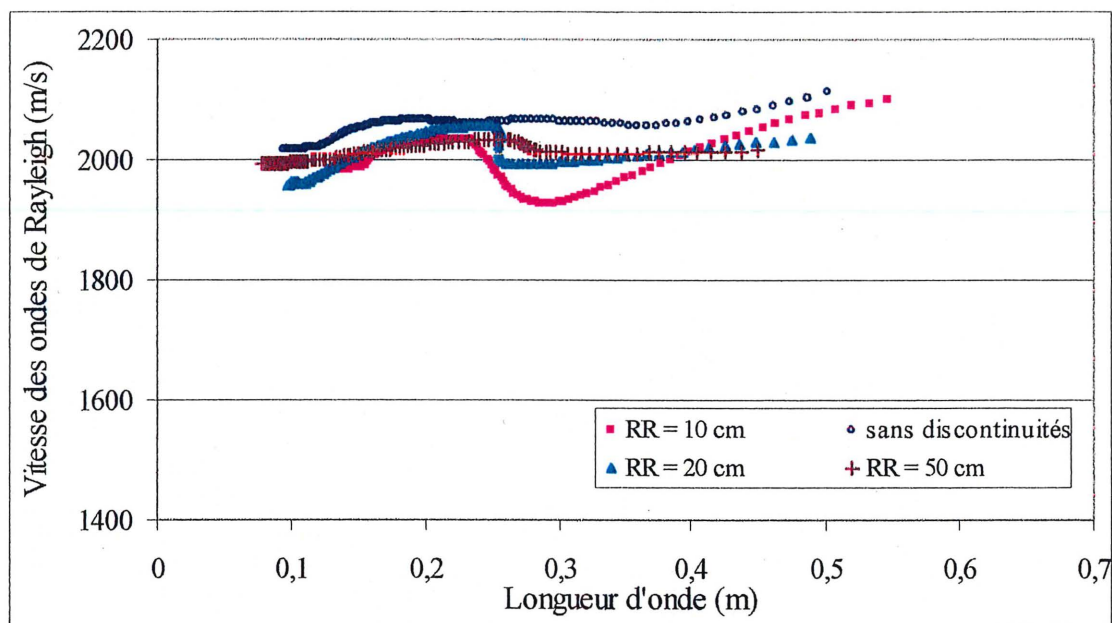


Figure 5.32 Influence de la discontinuité verticale 3 sur les courbes de dispersion

Globalement, la propagation des ondes de Rayleigh est sensible à la présence d'une discontinuité verticale dans le béton. Cependant une discontinuité proche de la surface aura plus d'effet qu'une discontinuité profonde. D'autre part, l'influence de la discontinuité est plus importante pour de faibles distances RR . Il est donc possible de la détecter en considérant différentes distances entre récepteurs sans pour autant pouvoir évaluer son étendue en profondeur à partir des courbes de dispersion.

5.5.2. Discontinuités horizontales

La présence d'une discontinuité horizontale dans le béton perturbe également la propagation des ondes de Rayleigh. La figure 5.33 montre que la discontinuité horizontale affecte la vitesse de propagation des ondes de longueurs d'onde supérieures à 15 cm environ, soit la profondeur de la discontinuité. La discontinuité horizontale 2 (Figure 5.34) se manifeste également par une diminution de la vitesse pour des ondes de longueurs d'onde supérieures à 30 cm environ. Les ondes de faibles longueurs d'onde se propagent dans la couche 1 alors que les ondes de longueurs d'onde supérieures à 12 cm se propagent à travers la couche 1 et la discontinuité.

Comme pour les discontinuités verticales, la distance entre récepteurs a aussi une influence sur les résultats. En effet, la diminution de la vitesse due à la présence de la discontinuité est moins significative pour la distance RR de 50 cm. Ainsi, il est possible de détecter le défaut en effectuant plusieurs essais avec différentes distances entre récepteurs. Il reste que l'influence de la discontinuité est plus importante pour la discontinuité horizontale 1 relativement à la discontinuité horizontale 2 qui est située à une plus grande profondeur. Notons aussi que les courbes de dispersion ne donnent aucune information sur l'épaisseur de la discontinuité.

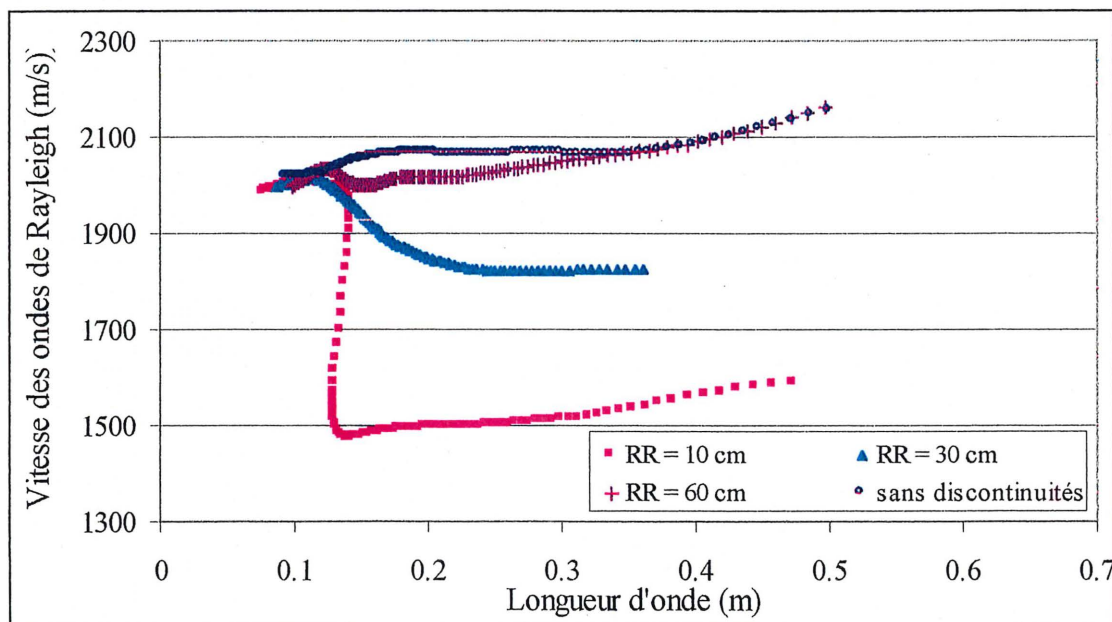


Figure 5.33 Influence de la discontinuité horizontale 1 sur les courbes de dispersion

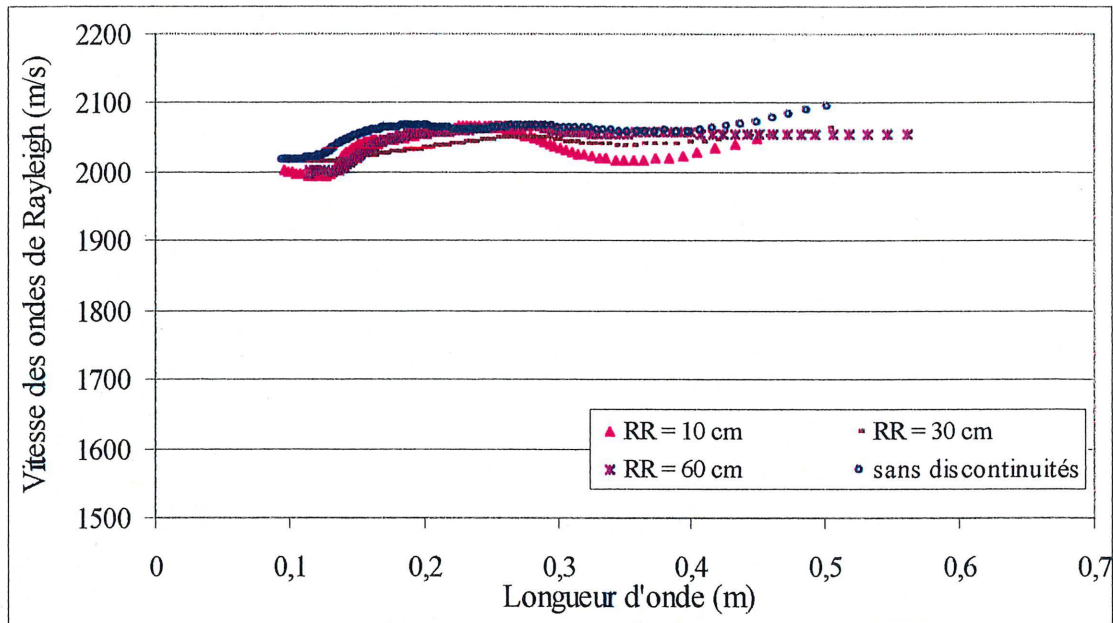


Figure 5.34 Influence de la discontinuité horizontale 2 sur les courbes de dispersion

Jusqu'à présent les analyses faites sur les courbes de dispersion ont montré qu'il est possible de détecter la présence d'une discontinuité sans pour autant pouvoir évaluer son épaisseur. Toutefois, il serait intéressant de savoir si l'on peut distinguer une discontinuité verticale d'une discontinuité horizontale située à la même profondeur. Pour cela, comparons les courbes de dispersion de la figure 5.31 qui correspondent à la discontinuité verticale 2 à celles de la figure 5.33 obtenues avec la discontinuité horizontale 1. Globalement, l'allure des courbes est semblable et il est très difficile de différencier, à partir de ces seules courbes, la discontinuité verticale de la discontinuité horizontale. La même constatation peut être faite pour les discontinuités verticale 3 et horizontale 2 situées à des profondeurs comparables. Il apparaît donc que les résultats ne sont pas affectés par l'orientation de la discontinuité. En somme, les seuls paramètres qui influencent les courbes de dispersion sont la profondeur du défaut et la distance entre récepteurs. Cette conclusion rejoint celles des travaux de simulation réalisés par Gucunski et col. (1995) et Ganji et col. (1997). Cependant Gucunski et col. avaient constaté que la densité de l'obstacle ainsi que son épaisseur avaient également une influence sur les résultats. Par contre les discontinuités introduites dans nos modèles expérimentaux avaient toutes la même densité et il n'a donc pas été possible d'évaluer l'influence de ce paramètre. La majorité des études réalisées sur l'effet des obstacles présent dans le milieu de propagation sont basées sur des

simulations numériques. Ce travail permet d'apporter des résultats expérimentaux qui pourront être utilisés pour d'éventuelles études numériques.

CHAPITRE 6

APPLICATION DE L'ASOS SUR UNE STRUCTURE EN SERVICE

6.1. Introduction

Dans les chapitres précédents, il a été question de l'application de la technique d'analyse spectrale des ondes de surface en laboratoire sur des blocs en béton. Les possibilités et les limites principales de cette méthode ont pu être présentées. L'aptitude de cette technique à décrire certaines propriétés du béton est bien réelle. Afin d'aboutir à l'objectif de cette étude qui est l'utilisation de la technique pour évaluer l'état des structures de béton présentant un endommagement de surface, une application in situ a été réalisée sur un barrage en béton : l'aménagement Chutes Hemming.

Les objectifs de ce chapitre sont de mettre en œuvre la technique sur une structure en service, d'acquérir une expérience de terrain, d'utiliser la technique suivant la même procédure définie en laboratoire et d'explorer son aptitude à évaluer l'état d'un béton ayant subi un vieillissement naturel. Deux activités seront décrites dans ce chapitre. La première activité a trait à l'auscultation de la face aval d'un barrage en service. La seconde concerne des essais de laboratoire effectués sur des échantillons de béton prélevés sur la structure afin de valider les résultats de l'ASOS.

6.2. Description du barrage

L'aménagement Chutes Hemming (Figure 6.1) est une structure en béton exploitée par Hydro-Québec. La structure est située sur la rivière Saint François à l'extrémité Ouest de la municipalité de Drummondville. La centrale des Chutes Hemming a été mise en service à la fin des années vingt. En plus de deux barrages en remblai, l'aménagement comprend une cloison gauche, une cloison droite, un mur guideau, un évacuateur et une prise d'eau. Seule la face aval de la cloison gauche a fait l'objet d'essais dans le cadre de cette étude.

La cloison gauche est un barrage poids en béton localisé du côté sud (rive gauche) de la rivière. Sa longueur est d'une centaine de mètres et sa crête se situe à une élévation de 98 m sur la

majorité de sa longueur. La hauteur maximale hors du sol du barrage est de 6 mètres environ du côté aval (ouest). La crête possède une largeur de 2,5 mètres qui rétrécit à moins de 1 mètre à l'extrême est (amont). Cette cloison gauche a été réparée en 1952 par l'application d'un béton de réfection sur les parements exposés.

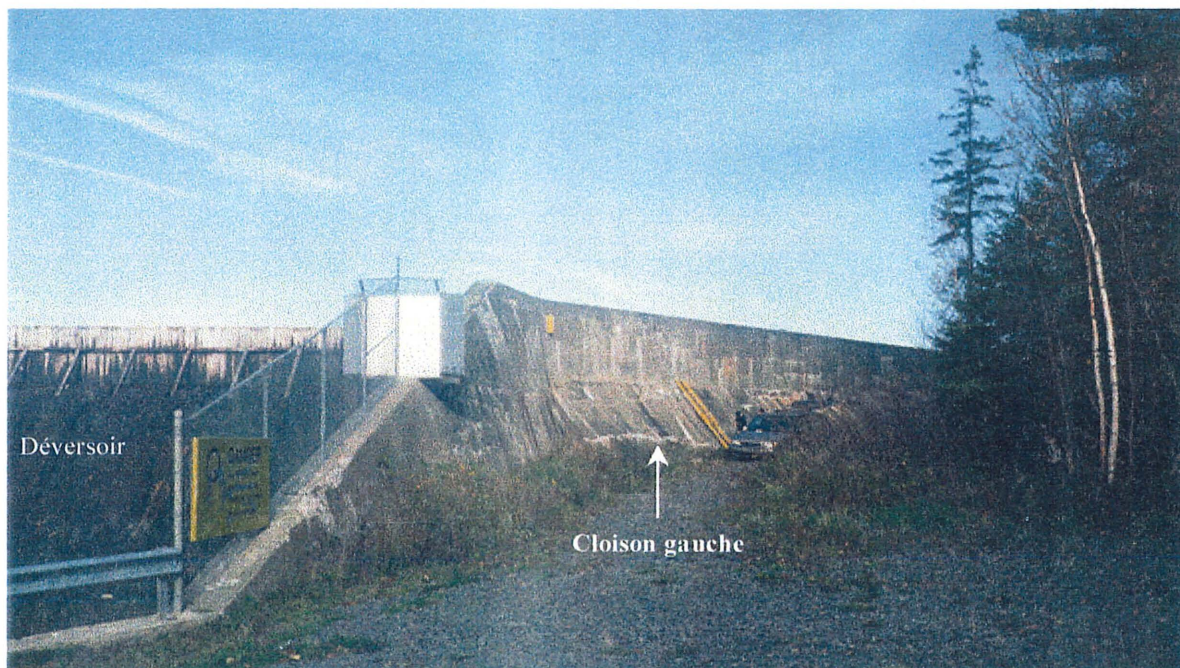
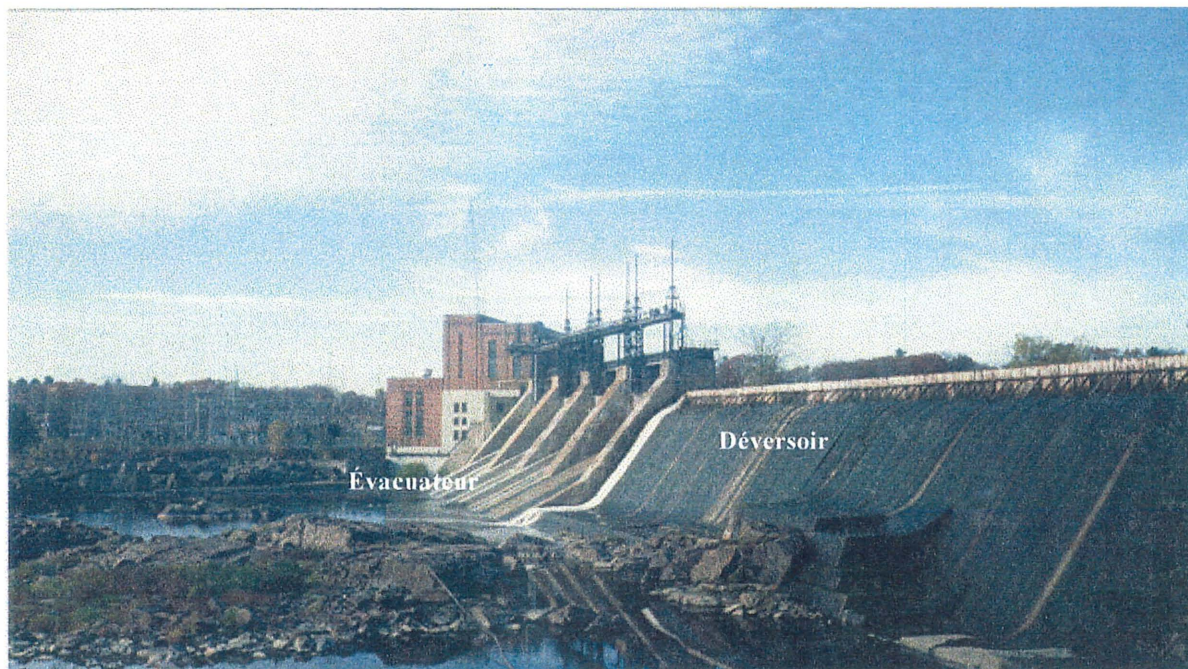


Figure 6.1 Vue générale de l'aménagement Chutes Hemming

6.2.1. Investigations antérieures

En 1993 un laboratoire (Les laboratoires Shermont INC.) a réalisé des investigations du béton des différentes parties du barrage (Rapport d'investigation du barrage Chutes Hemming, Les laboratoires Shermont INC., 1994). Concernant la cloison gauche, un forage (F-4) de 45 mm de diamètre et de 11,5 m de longueur a été effectué verticalement à partir de la crête, au chaînage 0+007 m. Quatre carottes horizontales ont été prélevées de la face aval (Figure 6.2). Le chaînage 0+000 m a été défini comme étant l'extrémité ouest de la cloison. Des relevés visuels ont également été fait sur les parements aval et amont.

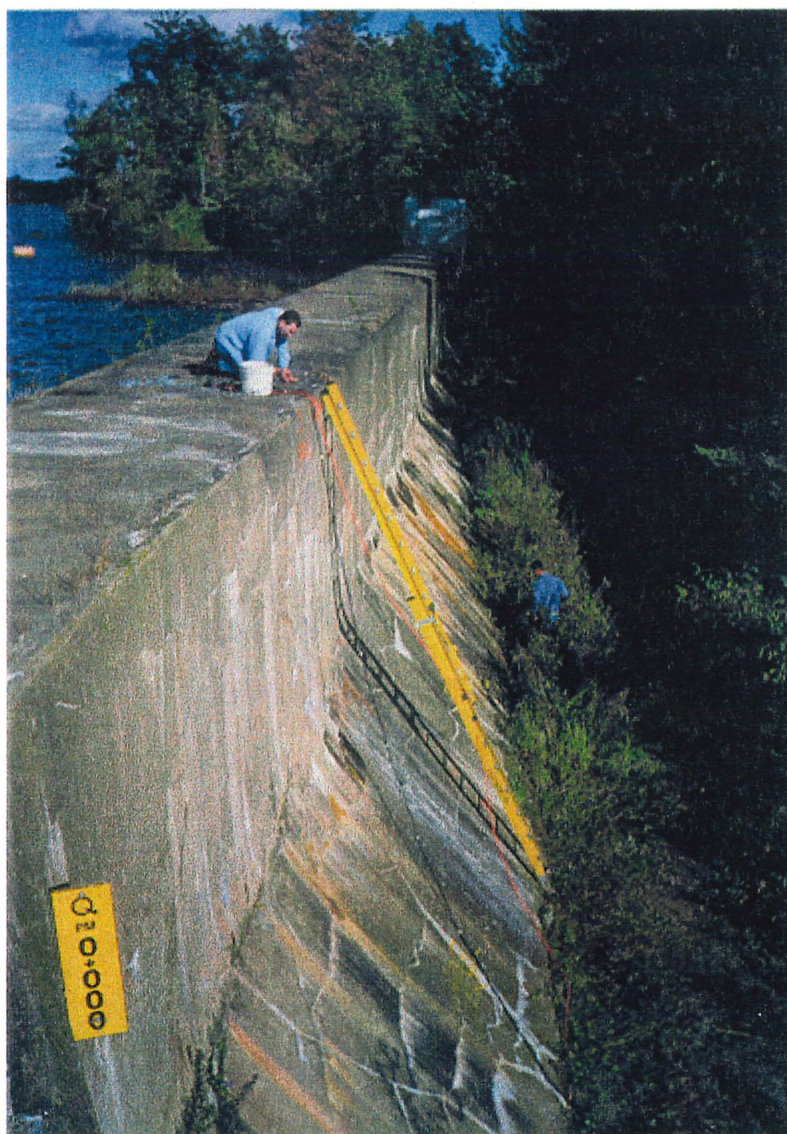


Figure 6.2 Photographie de la cloison gauche de l'aménagement Chutes Hemming

Selon les investigations de ce laboratoire, des réparations avec un béton ont déjà été effectuées sur l'ensemble de la surface de la face aval jusqu'au chaînage 0+070 m. L'adhérence du mortier à l'ancien béton n'était pas mauvaise si ce n'est entre les chaînages 0+000 m et 0+010 m où le béton de réparation était quelque peu dégradé sur une profondeur comprise entre 10 et 30 mm. Le béton de masse a été analysé par le biais du forage F-4, réalisé à un mètre du bord du parement amont. Ce béton localisé au centre de la structure est de meilleure qualité relativement à celui des carottes. L'épaisseur du béton de réparation, constatée sur les carottes prélevées, varie entre 75 et 275 mm.

6.2.2. Localisation des essais

Les conclusions du rapport d'investigation du béton indiquent que l'effet du vieillissement sur la face aval est accentué entre les chaînages 0+000 m et 0+010 m. Cette portion de la cloison est la plus intéressante pour une évaluation de la qualité du béton en raison de sa dégradation et de la disponibilité de nombreuses informations relatives à l'état du béton.

Une inspection visuelle de cette zone a permis de confirmer les conclusions du rapport cité précédemment et de définir avec exactitude la localisation des essais. La figure 6.3 décrit la zone d'essai ainsi que ses principales caractéristiques. De nombreuses fissures superficielles ont été constatées sur la face aval (Figure 6.2), mais le béton de surface semblait avoir une assez bonne intégrité. Sur la crête du barrage, une fissure située à 12 centimètres environ du bord de la face aval au chaînage 0+009 m, parcourt longitudinalement le barrage. Cette fissure correspond au décollement du béton projeté de l'ancien béton.

6.3. Programme d'essai

Le programme d'essai a comporté deux phases : l'une relative à l'auscultation du barrage et la seconde a concerné des travaux en laboratoire sur des carottes afin de valider les résultats de l'auscultation.

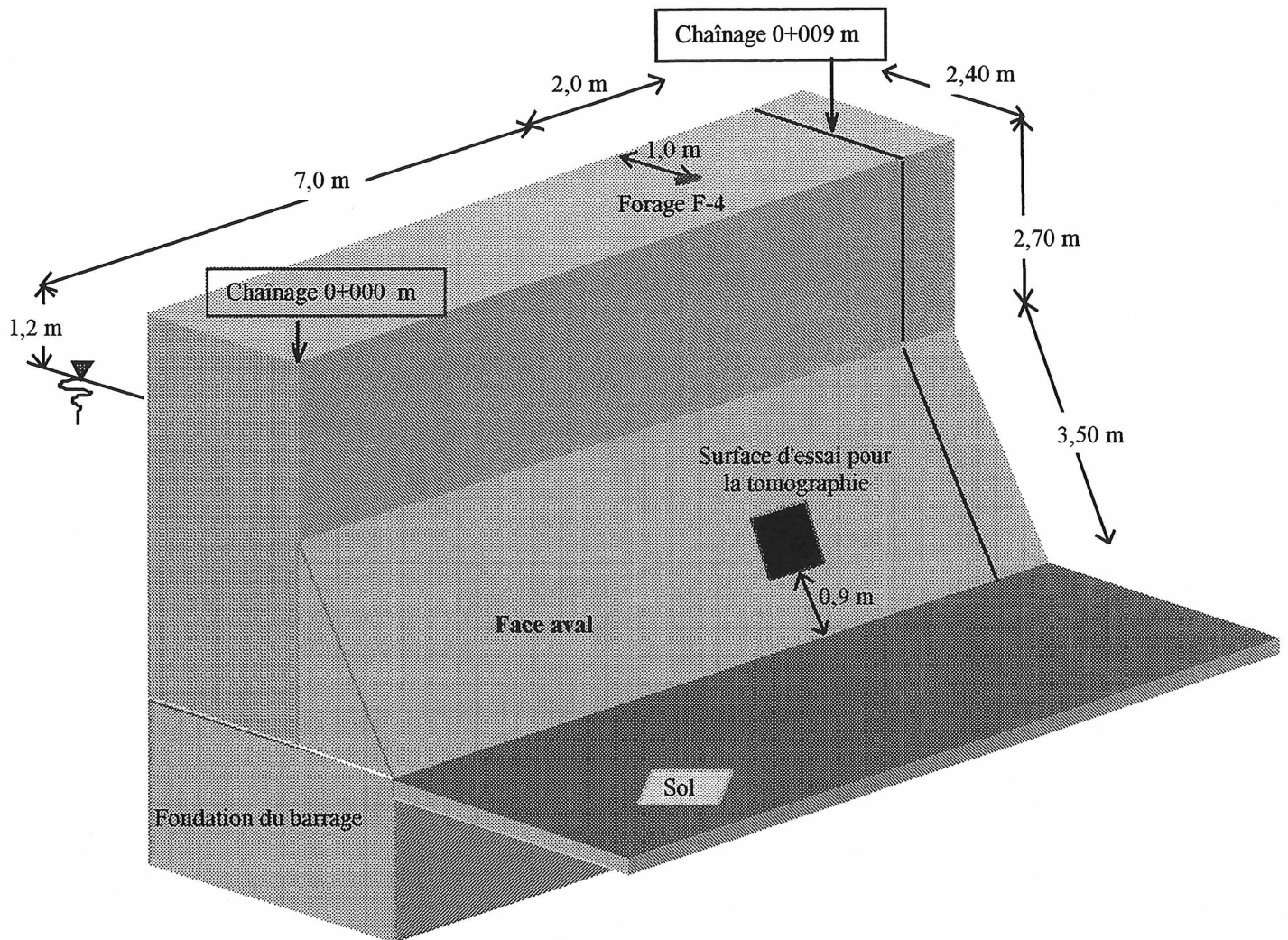


Figure 6.3 Caractéristiques de la cloison gauche entre les chaîn ages 0+000 m et 0+010 m

6.3.1. Auscultation du barrage

Lors de l'auscultation du barrage, la technique d'analyse spectrale des ondes de surface (ASOS) a été utilisée avec deux procédures différentes. La première consistait à appliquer la technique telle que décrite au chapitre 3, alors que la seconde était l'application de la tomographie associée à l'analyse spectrale des ondes de surface.

6.3.1.1. Application de l'analyse spectrale des ondes de surface

Il a été choisi d'ausculter la face aval sur un profil vertical afin d'essayer de suivre la variation de l'état du béton en fonction de l'élévation. Cette ligne correspond au chaînage 0+009 m et les essais ont été réalisés à dix positions différentes (Figure 6.4). Les mesures ont été effectuées avec un intervalle de 0,5 m sur la face inclinée et de 1 m sur le restant de la face aval.

Pour toutes les positions, les accéléromètres ont été disposés à égale distance de part et d'autre de la ligne. La source a été appliquée sur une ligne horizontale joignant les deux accéléromètres et à une distance SR du premier récepteur. La procédure concernant l'application de l'analyse spectrale des ondes de surface est la même que celle utilisée au laboratoire.

Des essais de reconnaissance ont été effectués sur le milieu de propagation. Ces essais de faisabilité ont permis de déterminer quelles étaient les sources les plus adaptées pour le matériau à explorer et quelle était la distance entre récepteurs la plus avantageuse compte tenu de la qualité du matériau. Les sources utilisées étaient la bille C, le marteau et le soniscope. Les caractéristiques de ces sources sont données dans le chapitre 4. L'utilisation du soniscope s'est avérée inutile pour les mêmes raisons que pour les essais de laboratoire. La distance entre les récepteurs retenue, après ces essais de reconnaissance, était égale à 0,5 m pour l'ensemble des positions. Quant à la distance SR adoptée pour ces essais, elle était de 0,5 m pour la bille C et de 1 m pour le marteau. La distance de 1 m a été prise parce que les signaux obtenus avec le marteau pour une distance SR de 0,5 m étaient de très mauvaises qualités comparativement à ceux obtenus avec la bille C.

L'acquisition des mouvements détectés par les deux récepteurs a été effectuée par le biais de la chaîne d'acquisition en utilisant le programme *Gageali*. Pour le traitement, une moyenne sur trois signaux a été considérée pour chaque récepteur. La fréquence d'échantillonnage et le nombre de points utilisés étaient respectivement 200 KHz et 2048.

Pour de nombreuses positions, il a été très difficile d'obtenir des signaux de qualité satisfaisante. Il a fallu répéter les essais à plusieurs reprises. Parfois, il suffisait de déplacer légèrement le lieu d'application de la source pour améliorer la qualité des signaux. De manière générale, un contact plus bref du marteau ou de la bille avec le béton permettait d'obtenir de meilleurs signaux.

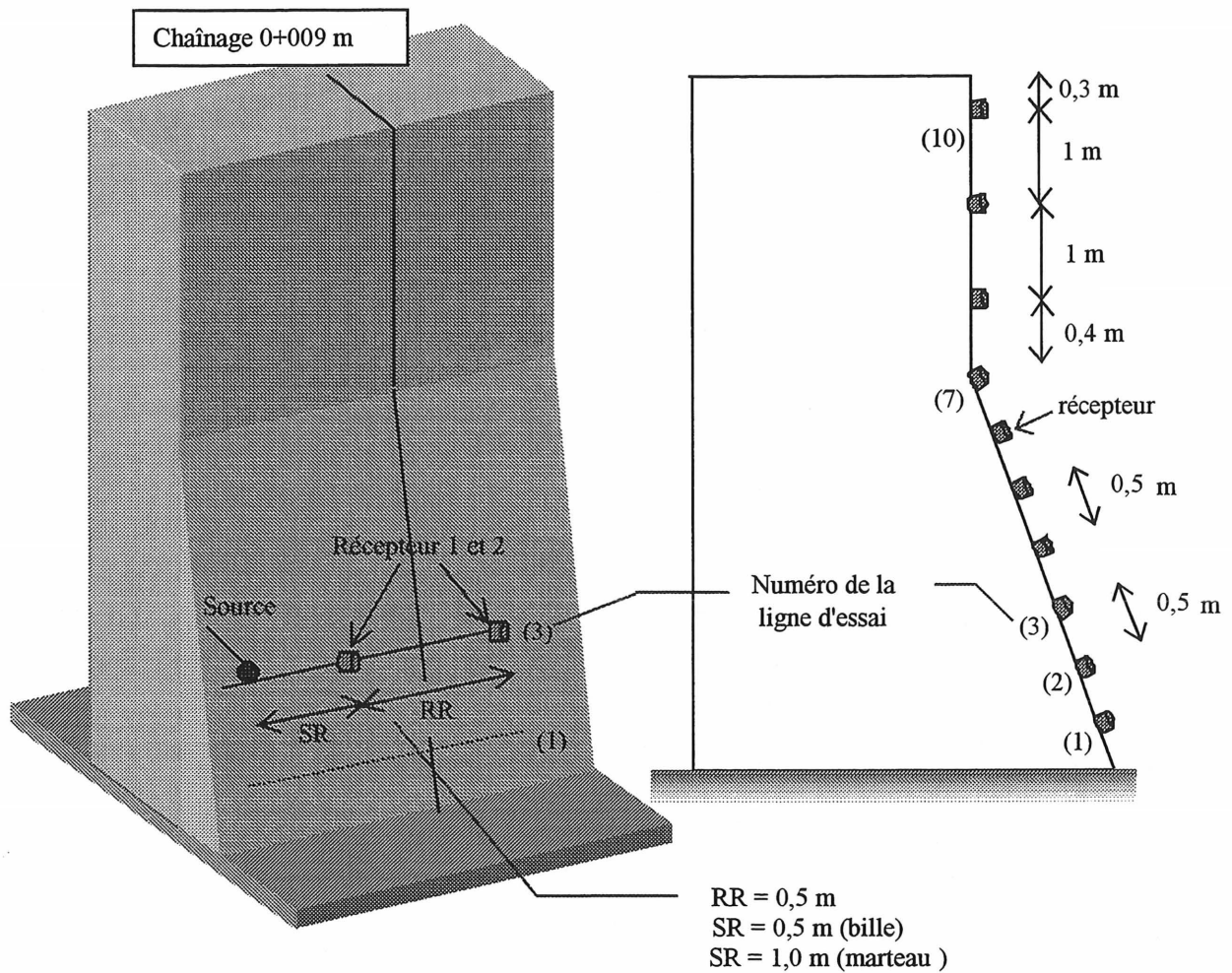


Figure 6.4 Caractéristiques des positions d'essais le long du chaînage 0+009 m

6.3.1.2. Application de la tomographie associée à l'analyse spectrale des ondes de surface

Les essais effectués dans le cadre de cette partie ont pour but d'utiliser le principe de la tomographie et d'exploiter l'un des résultats obtenu au chapitre 5. En effet, au cours de ce chapitre on a vu que la distance SR a peu d'influence sur l'allure des courbes de dispersion et qu'il est possible d'effectuer des essais d'ASOS en considérant une distance SR nulle. Quant à la tomographie d'un milieu, elle consiste à dresser la carte de la répartition spatiale d'une propriété physique de ce milieu tel que la vitesse de propagation d'une onde. L'une des applications célèbre de la tomographie n'est autre que le scanner.

Pour la définition de la tomographie sonore on se référera au travail de Y. Kharrat (1991). De plus amples informations sur la tomographie et ses applications dans le domaine du génie civil peuvent être obtenues en consultant son mémoire de doctorat.

a) Principe de la tomographie associée à l'ASOS

Considérant un milieu (Figure 6.5) où l'on dispose un ensemble de récepteurs sur le côté A et une source mobile sur le côté B, cette dernière correspond à un récepteur auprès duquel on applique une source (marteau,...). Pour chaque utilisation de la source, les récepteurs enregistrent des signaux dont le trajet entre la source et le récepteur est appelé rai par analogie à l'optique géométrique.

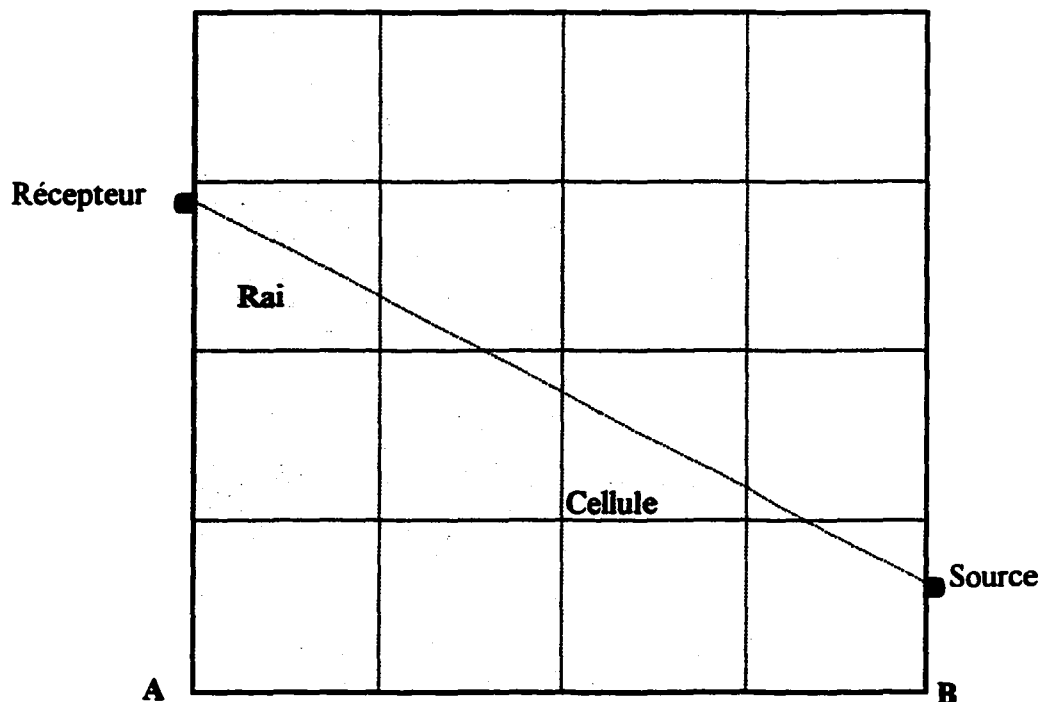


Figure 6.5 Configuration de mesure et discrétisation du milieu en plusieurs cellules

Les diverses positions de la source et des récepteurs nous permettent d'obtenir les temps de propagation de l'onde de Rayleigh entre ces positions et pour différentes longueurs d'ondes. On peut également en déduire les courbes de dispersion correspondant à chacun des couples source-récepteur. Il est évident que la multiplication du nombre de position de la source et des récepteurs aura pour effet d'augmenter le nombre de rai et de mieux couvrir le milieu.

Connaissant les longueurs d'ondes et la distance séparant les différentes positions de la source et des récepteurs, les temps de propagation sont alors utilisés pour construire la distribution des vitesses dans le milieu considéré. Toutefois pour obtenir ces vitesses de propagation à partir des temps de propagation il faut passer par un processus d'inversion. Auparavant le milieu est divisé en plusieurs cellules (Figure 6.5). L'étape finale consiste à dresser une image de la répartition des vitesses dans le milieu en 3 dimensions. La troisième dimension correspond à la longueur d'onde que l'on assimile à la profondeur.

b) Description des essais

Les essais ont été réalisés sur la face aval du barrage en utilisant la bille C comme source. Une maille carrée de 0,6 m x 0,6 m a été retenue pour les essais (Figure 6.6). La source était appliquée près du premier récepteur et la distance SR est considérée comme nulle. Cette maille se situe entre les chaînages 0+006 m et 0+007 m.. Le choix a été fait sur une longueur de 0,6 m en raison de l'atténuation très importante des signaux pour des distances entre les récepteurs supérieures à 0,8 m.

Les caractéristiques de l'essai sont décrites sur la figure 6.7. L'essai a été réalisé en deux étapes et en utilisant cinq accéléromètres. Lors de la première étape, quatre accéléromètres ont été disposés sur le coté Ouest du carré, à quatre positions différentes et avec un intervalle de 0,2 m (Figure 6.7-a). Chacun de ces accéléromètres a été utilisé comme second récepteur conformément à la configuration de l'ASOS. Quant au premier récepteur, que l'on appellera «*déclencheur*», il a été installé successivement sur les 4 positions du coté Est du carré. Concernant la deuxième étape, la mise en place des récepteurs était identique à celle de la première étape, si ce n'est que le déclencheur a été installé sur le coté Nord et les autres accéléromètres sur le coté Sud (Figure 6.7-b).

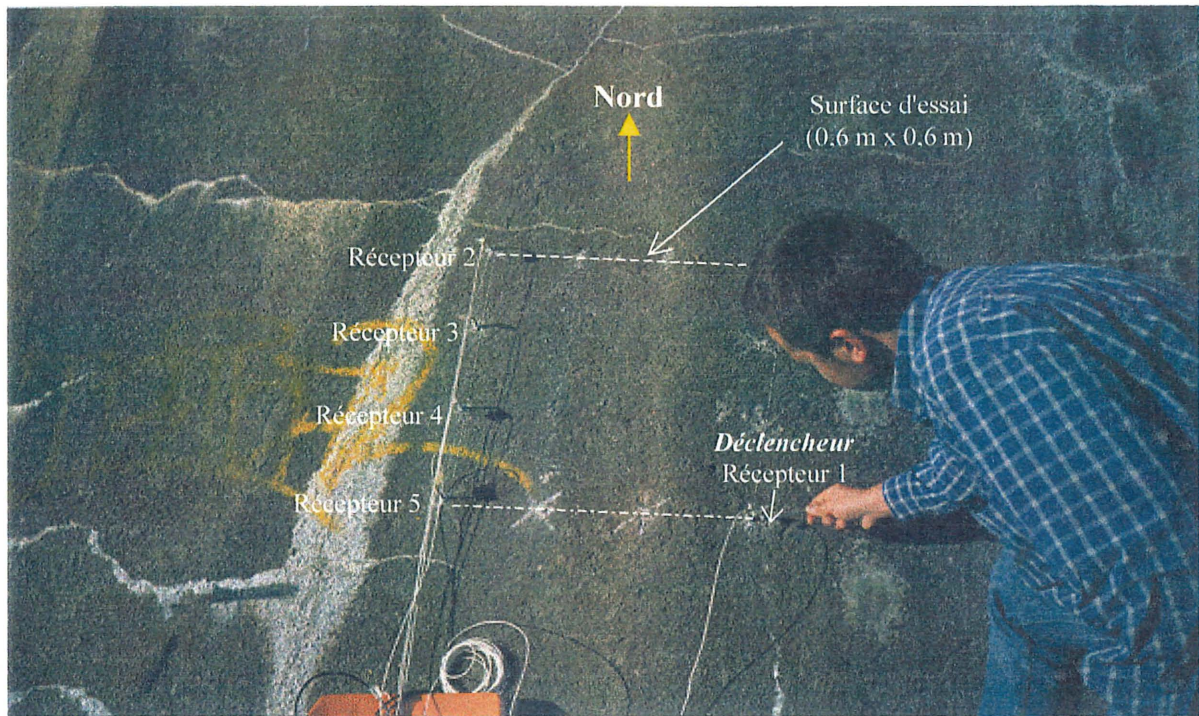


Figure 6.6 Disposition de la source et des récepteurs lors d'un essai de tomographie (deuxième série d'essai avec la source à sa position 4 sur le coté Est)

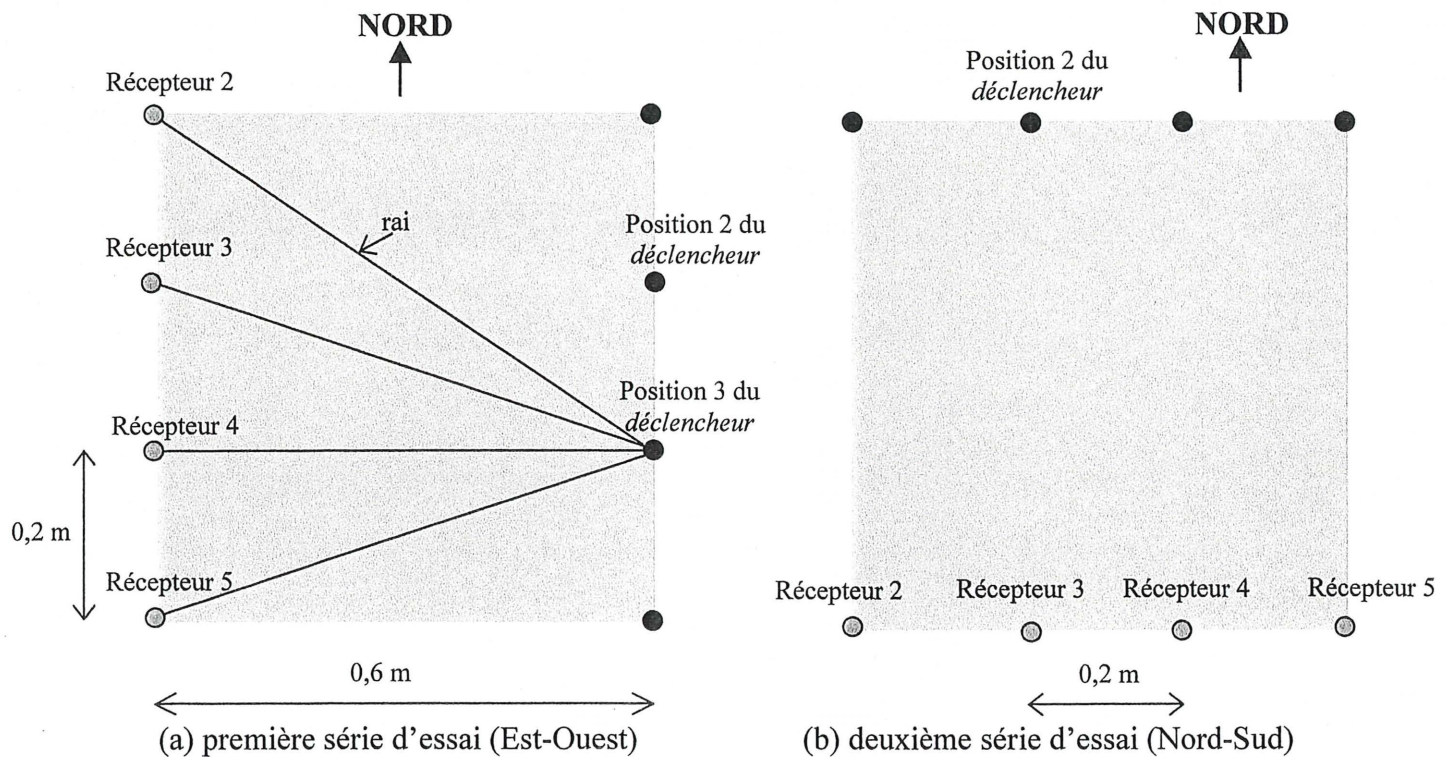


Figure 6.7 Configuration des essais de tomographie

Les mesures ont également été effectuées en 2 séries. Pour la première série d'essai, le *déclencheur* était disposé sur le coté Est et les récepteurs sur le coté Ouest. Pour chacune des positions du *déclencheur*, 5 signaux étaient enregistrés par le déclencheur et les 4 récepteurs. Relativement à la configuration de l'ASOS, le signal enregistré par le déclencheur était celui du premier récepteur et chacun des signaux enregistrés par les autres accéléromètres correspondait à celui du second récepteur. Ensuite, seul le déclencheur était déplacé vers une autre position et 5 autres signaux étaient enregistrés. Quatre courbes de dispersion ainsi que les temps de propagation correspondants étaient obtenues pour chacune des positions du déclencheur. Pour la seconde série d'essai, le *déclencheur* était installé sur le coté Nord et les récepteurs sur le coté Sud. Les mêmes étapes effectuées lors de la première série ont été répétées. Les deux séries d'essais correspondent à deux séries de raies : de l'Est vers l'Ouest et du Nord vers le Sud. Les essais ont été effectués sur les 4 cotés afin d'augmenter le nombre de raie, soit 32 raies pour l'ensemble des deux séries. La distance entre le déclencheur et les récepteurs varie de 0,6 m à 0,85 m, selon la position du déclencheur et du récepteur.

L'enregistrement des signaux a été effectué avec la chaîne d'acquisition et en utilisant le logiciel *Gagescope*. Ce logiciel ne permet pas d'effectuer une moyenne sur les signaux mais permet d'enregistrer simultanément 5 signaux, ceux du déclencheur et des 4 récepteurs. La fréquence d'échantillonnage et le nombre de points étaient respectivement de 200 KHz et de 2048. La mise en œuvre de cet essai a été assez longue car il s'est avéré très difficile d'obtenir des signaux de qualité pour tous les récepteurs simultanément.

Le processus d'inversion a été effectué avec le logiciel «3Dtom». Les paramètres de reconstruction considérés sont des cellules de 0,15 m x 0,15 m x 0,15 m et un résidu du processus itératif de l'ordre du pas d'échantillonnage des signaux. Quant à la construction de l'image tomographique, elle a été réalisée avec le logiciel «Spyglass».

6.3.2. Travaux de laboratoire

Des travaux de laboratoire ont été effectués sur des carottes de béton de 100 mm de diamètre prélevées sur la face aval du barrage (Figure 6.8). Les travaux de laboratoire ont permis de caractériser le béton de ces carottes à partir d'un diagnostic visuel et des essais soniques et

mécaniques. Il faut noter que l'essai sonique étant non-destructif, les mêmes échantillons ont pu être utilisés pour les essais soniques et les essais mécaniques.



Figure 6.8 Photographie du lieu de prélèvement des carottes

Les échantillons de béton utilisés pour les essais ont été récupérés sur trois carottes provenant de la même zone que celle des essais d'auscultation. Les trois carottes A, B et C (Figure 6.9) ont été extraites entre les chaînages 0+006 m et 0+010 m (Tableau 6.1).

Tableau 6.1 Caractéristiques des carottes prélevées

Carottages de 100 mm				
Numéro	Chaînage (m)	Élévation (m)	Longueur ⁽¹⁾ (m)	Qualité ⁽²⁾
A	0+006,5	93	0,84	moyenne
B	0+008,5	92,4	0,83	mauvaise
C	0+009	94	0,74	bonne

⁽¹⁾ Longueur totale de la carotte

⁽²⁾ Évaluation de l'adhésion du béton de réparation au béton original effectuée in situ au moyen d'un marteau

La carotte A a été prélevée au centre du carré qui a servi pour les essais de tomographie et la carotte C provenait de la position d'essai numéro 4 du chaînage 0+009 m. Quant à la carotte B, elle a été prélevée entre le chaînage 0+008 m et 0+009 m à environ 40 cm au-dessus du sol. Cette dernière carotte a été extraite dans le seul but de confirmer les résultats obtenus avec les deux autres carottes.

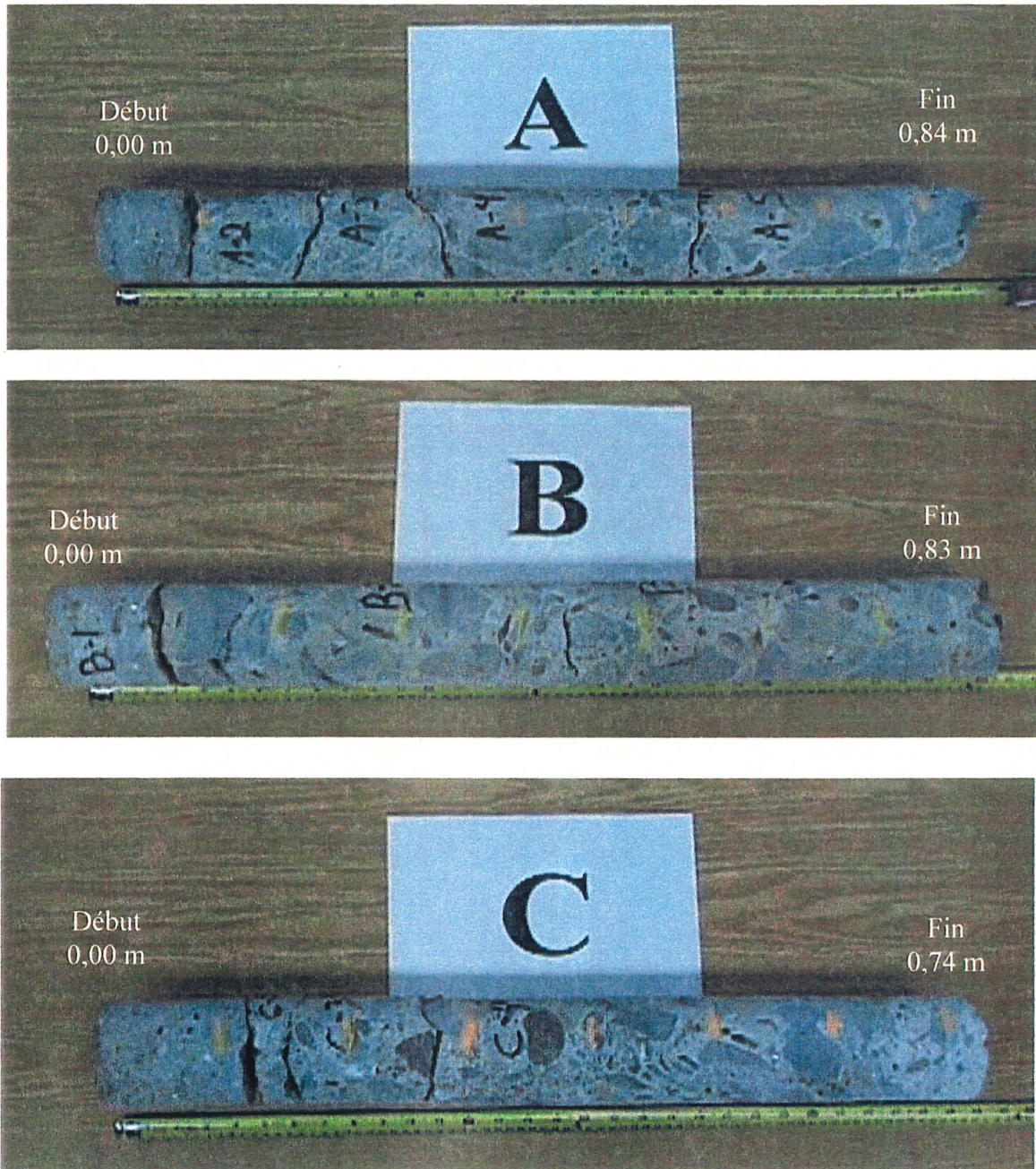


Figure 6.9 Photographies des carottes A, B et C

6.3.2.1. Essai sonique

L'essai sonique a été réalisé conformément à la norme ASTM C597 qui décrit la méthode standard pour la détermination des vitesses de propagation et les constantes élastiques dynamiques du béton en laboratoire. Cet essai est souvent utilisé pour déterminer la vitesse de propagation des ondes de volume P et S à travers un échantillon de béton afin d'établir l'uniformité et la qualité relative du béton. À partir de cet essai non destructif, il est possible de déterminer le module d'élasticité dynamique du matériau. Une estimation de la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh peut également être réalisée à partir de la relation 3-4.

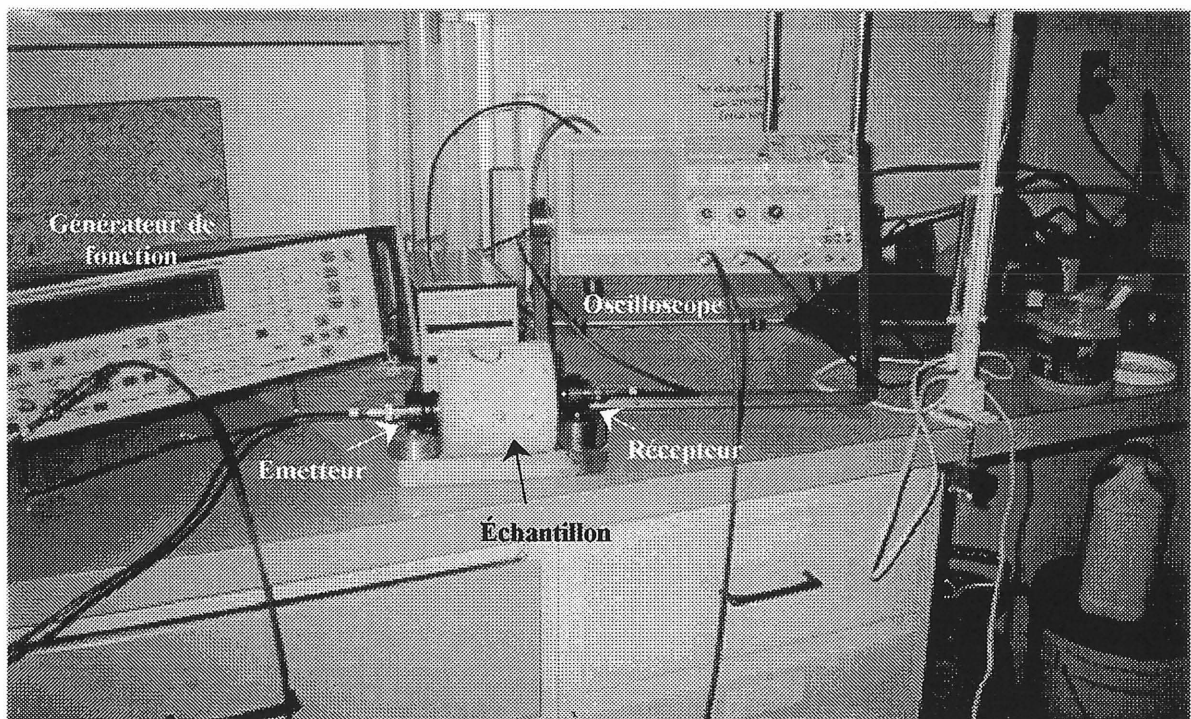


Figure 6.10 Configuration de mesure d'un essai sonique

Le principe de cette méthode (Figure 6.10), consiste à émettre un signal à partir d'une face de l'échantillon. L'onde émise se propage à travers le béton et elle est détectée sur la face opposée de l'échantillon. Les deux signaux émis et reçus sont instantanément visualisés avec un oscilloscope afin de mesurer le temps de propagation des ondes P et S à travers l'échantillon, soit T_P et T_S . Connaissant la longueur L de l'échantillon, il est possible de déterminer les vitesses de propagation V_P et V_S des ondes P et S à travers l'échantillon. Il est généralement difficile de distinguer l'arrivée des ondes S en visualisant un signal, mais sur de petits échantillons cela est

possible en utilisant des capteurs sensibles aux déformations transversales. L'arrivée des ondes S peut également se distinguer par un point d'inflexion sur le signal. Néanmoins, la mesure du temps de propagation des ondes S reste moins précise que celle des ondes P. Le module d'élasticité dynamique (E_d) et le coefficient de Poisson dynamique (ν_d) des échantillons peuvent être calculés, connaissant leur masse volumique ρ , avec les équations suivantes :

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad (6-1)$$

Selon la norme, l'échantillon doit avoir des surfaces lisses et parallèles. Un agent de couplage est à utiliser entre le capteur et l'échantillon. Lors de cet essai, le signal émis par le générateur de fonction était une sinusoïde avec une fréquence de 250 KHz, soit la même que la fréquence de résonance des capteurs piézo-électriques utilisés afin d'avoir la meilleure sensibilité.

6.3.2.2. Essais mécaniques

Des essais mécaniques ont été réalisés afin de mesurer la résistance à la compression du béton (f_c) et le module d'élasticité statique (E_s).

Après avoir déterminé la résistance ultime d'un des échantillon de béton, ces derniers ont été soumis à des chargements croissants allant jusqu'à 40 % de la charge ultime afin de mesurer les déformations longitudinales des échantillons, et d'en déduire leur module d'élasticité. Ces essais ont été réalisés conformément à la norme ASTM C469 et en utilisant des échantillons de 100 mm x 200 mm

Les essais de compression ont été réalisés sur les mêmes échantillons que ceux utilisés pour la mesure du module d'élasticité, selon la norme ACNOR A23.2-14C. Celle-ci recommande d'utiliser des échantillons de béton dont la longueur est égale au double du diamètre. Cependant, les carottes ont été récupérées en plusieurs morceaux et certaines d'entre elles n'atteignaient pas une longueur égale au double du diamètre.

6.4. Résultats des essais et interprétations

Les résultats des différents essais sont présentés en deux sections, les essais d'auscultation et les essais de laboratoire. Avant d'évaluer l'aptitude de la technique d'ASOS à caractériser le béton du

barrage il faut interpréter les résultats des essais de laboratoire et comparer l'ensemble des résultats.

6.4.1. Résultats des essais d'ASOS

Un milieu de propagation comme le parement aval d'un barrage peut quasiment être qualifié de milieu semi-infini en raison de ses grandes dimensions et de ses frontières très éloignées. D'ailleurs, les mouvements de particules enregistrés lors des essais montrent que les réflexions ne sont pas importantes comparativement aux essais de laboratoire effectués sur les blocs de béton. Les figures 6.11 et 6.12 illustrent des exemples de signaux obtenus lors des essais. On distingue, sur les signaux, de fortes amplitudes correspondant aux ondes de Rayleigh suivies par des oscillations de faibles amplitudes (réflexions) provenant probablement de l'interaction des ondes avec les petites fissures et avec les différentes composantes qui constituent ce milieu. Le marteau se distingue par les ondes générées qui sont basses fréquences relativement à celles générées avec la bille.

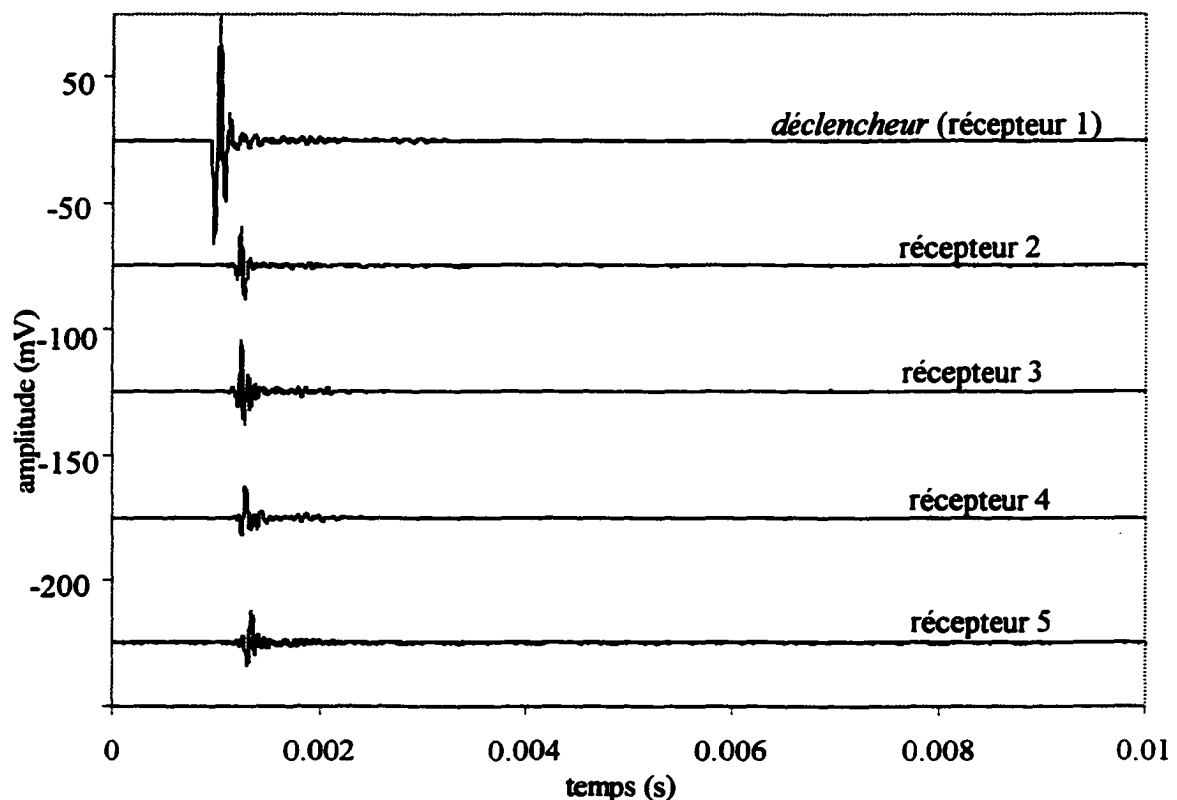
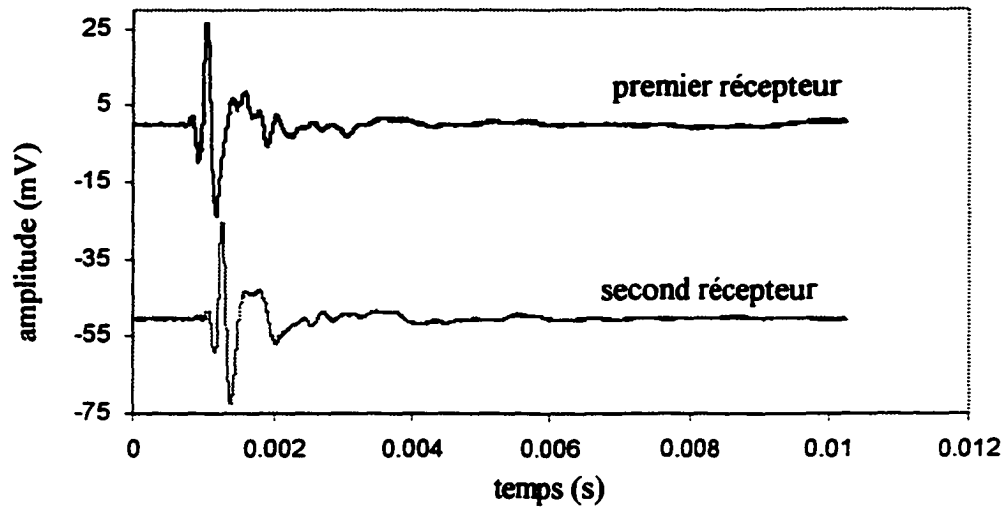
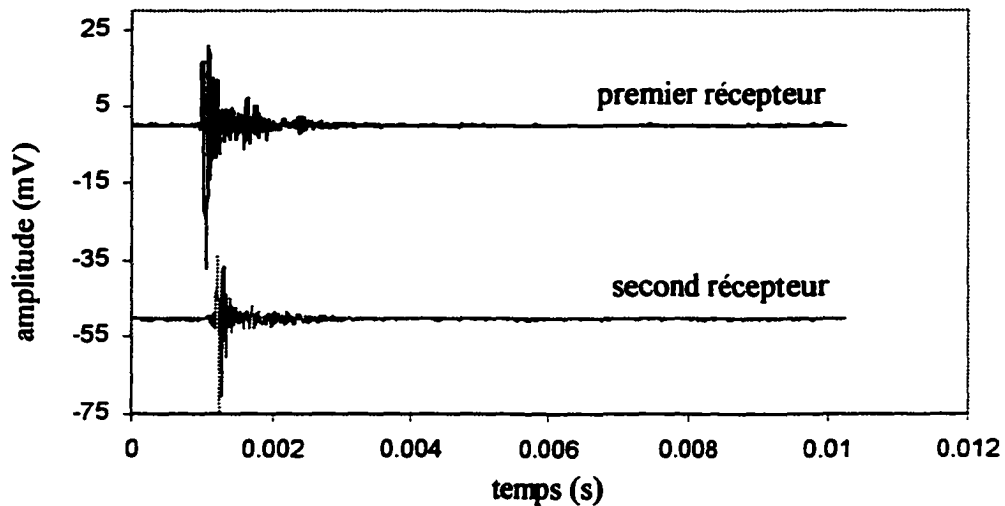


Figure 6.11 Exemple de signaux obtenus lors des essais de tomographie associée à l'ASOS



(a) avec le marteau comme source



(b) avec la bille comme source

Figure 6.12 Signaux non filtrés obtenus pour la position 1 du chaînage 0+009 m

Les signaux ont été filtrés afin d'atténuer les réflexions avant d'obtenir les spectres de phase et de déduire les courbes de dispersion. L'intervalle de fréquence utilisé pour la construction des courbes de dispersion est compris entre 5 KHz et 25 KHz avec la bille et entre 4 KHz et 7 KHz dans le cas du marteau. Ces fréquences concernent des longueurs d'onde comprises entre 9 cm et 55 cm pour la bille et entre 35 cm et 70 cm avec le marteau.

6.4.1.1. Résultats obtenus pour le chaînage 0+009 m

Les essais ont été effectués avec le marteau et la bille. Cependant le marteau n'a pas permis d'obtenir des informations sur les longueurs d'ondes inférieures à 35 cm environ et ce pour les dix positions du chaînage 0+009 m. Quelques-unes des courbes de dispersion obtenues avec le marteau sont présentées sur la figure 6.13 et sont comparées à celles obtenues avec la bille. Il apparaît donc que le marteau n'est pas la source adéquate pour évaluer la qualité du béton proche de la surface. Pour cette raison seules les courbes obtenues avec la bille sont analysées dans la suite de cette étude.

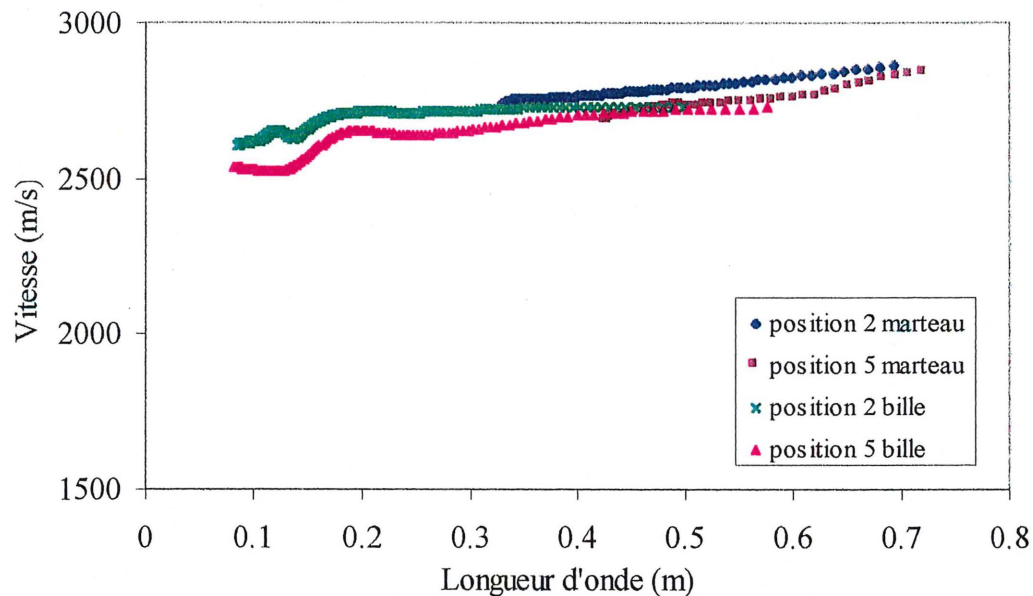


Figure 6.13 Courbes de dispersion obtenues avec la bille et le marteau pour quelques positions du chaînage 0+009 m.

Les courbes obtenues avec la bille pour les dix positions du chaînage sont données sur les figures 6.14, 6.15 et 6.16. La vitesse moyenne des courbes est proche de 2500 m/s, ce qui est relativement élevée. La vitesse obtenue en laboratoire est de 2350 m/s sur le BHP. Toutefois, un béton de barrage se caractérise généralement par une forte compaction et une taille de granulats de l'ordre de 60 à 100 mm, ce qui pourrait expliquer ces vitesses. L'essai sonique permettra de vérifier et de mieux discuter ce résultat.

Les allures des courbes sont semblables et indiquent que la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh augmente légèrement pour des longueurs d'ondes supérieures à 10-12 cm environ pour être quasiment constante pour des longueurs d'ondes supérieures à 20 cm environ. Cependant le contraste de vitesse est assez faible et il est de l'ordre de 100 à 200 m/s. Les vitesses des faibles longueurs d'ondes varient entre 2400 m/s et 2600 m/s et correspondent respectivement aux positions 9 et 4. Quant aux vitesses des grandes longueurs d'ondes (> 20 cm), elles sont comprises entre 2600 m/s et 2800 m/s respectivement pour les positions 6 et 7. Ces résultats laissent supposer des modules d'élasticité assez élevés et supérieures à 35 GPa (référence au bon béton utilisé en laboratoire).

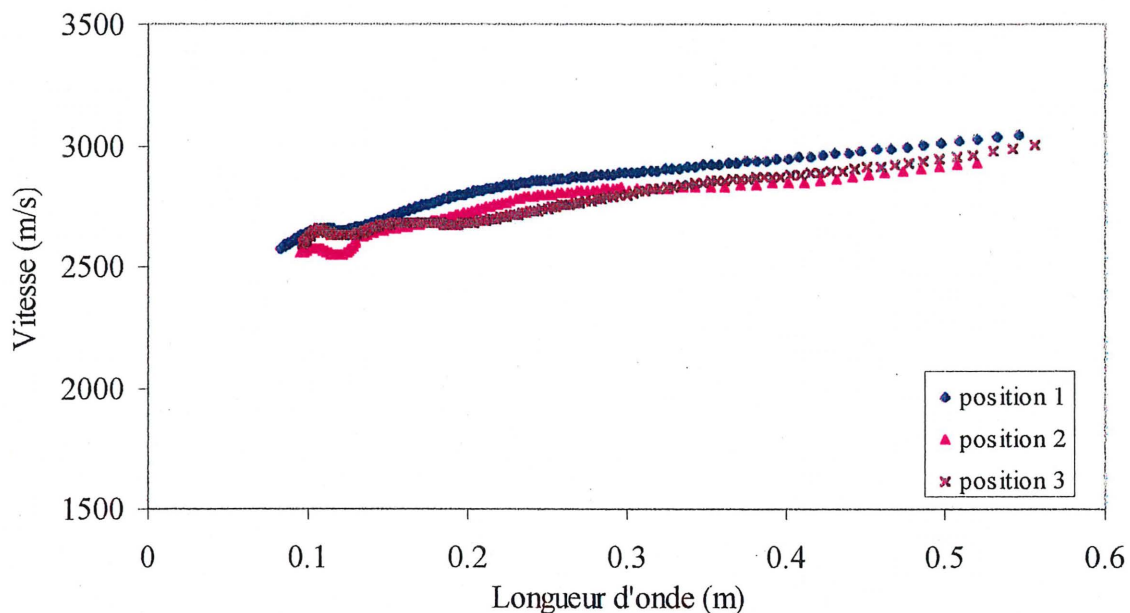


Figure 6.14 Courbes de dispersion obtenues pour la position 1, 2 et 3 en utilisant la bille

Les vitesses sont donc élevées pour toutes les positions et le béton est de très bonne qualité sur toute la hauteur du chaînage. L'interprétation de ces courbes est assez simple. Le premier palier de vitesse obtenu pour de faibles longueurs d'onde semble correspondre à une première couche de béton d'assez bonne qualité, étant donné la vitesse de propagation élevée des ondes de Rayleigh, mais de qualité inférieure à celle du béton situé plus en profondeur (> 15 cm environ). Les propriétés générales du béton s'améliorent avec la profondeur et varient très peu pour des longueurs d'ondes supérieures à 15-20 cm. La profondeur de la première couche de béton peut

être située à 10 cm environ de la surface. Tenant compte des conclusions du laboratoire Shermont relatives à la cloison gauche, les faibles longueurs d'ondes correspondent au béton de réfection et les longueurs d'ondes plus grandes concernent le béton de masse d'où la différence de vitesses constatée sur les courbes de dispersion.

Aussi, le gradient de vitesses entre les différentes positions est assez faible et n'indique aucune zone de faiblesses ou variation de la qualité du béton suivant la hauteur de la cloison.

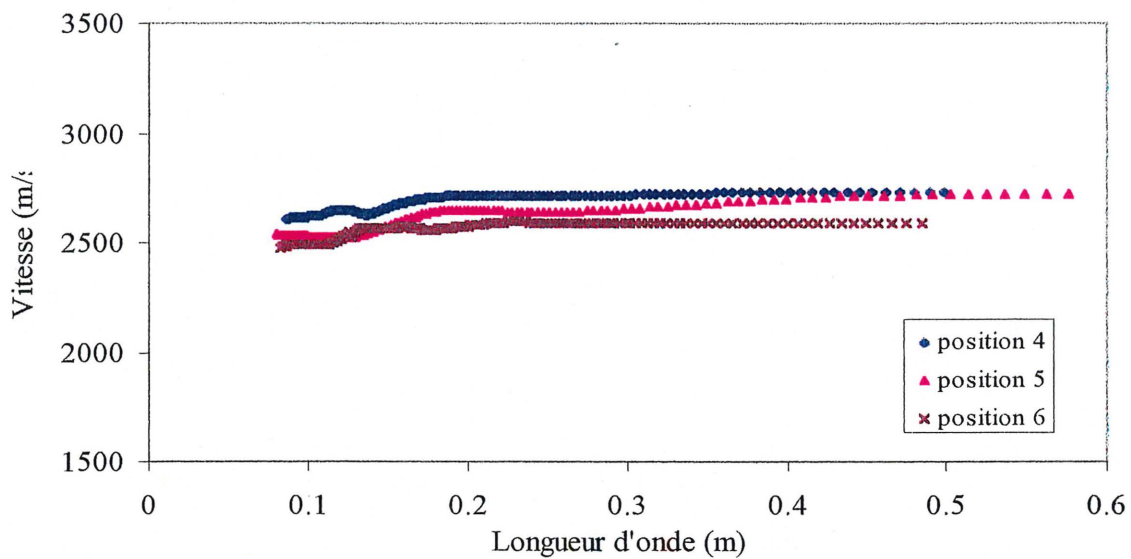


Figure 6.15 Courbes de dispersion obtenues pour la position 4, 5 et 6 en utilisant la bille

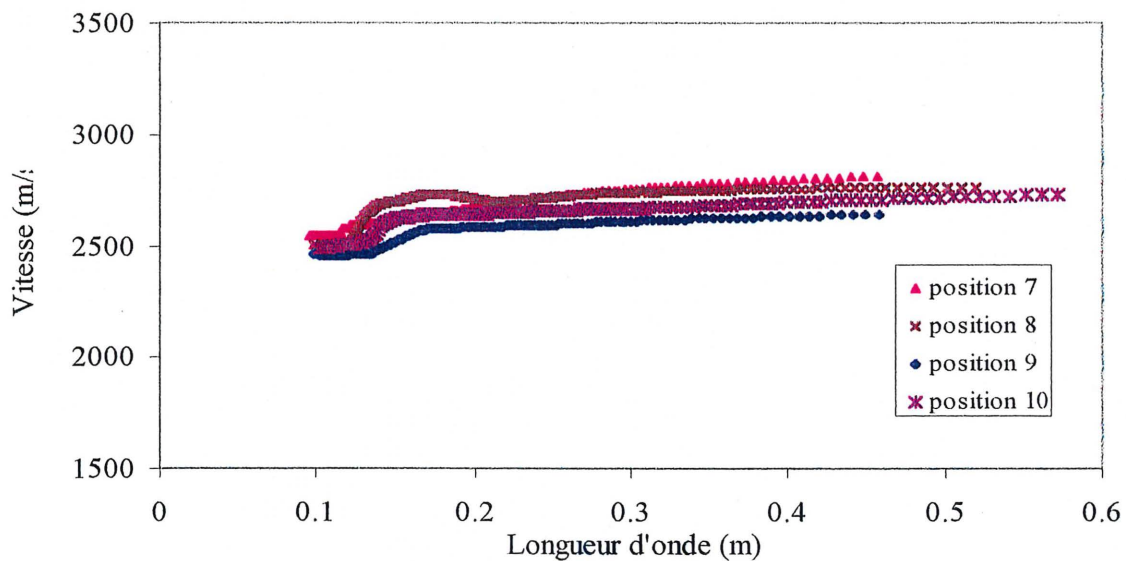


Figure 6.16 Courbes de dispersion obtenues pour la position 7, 8, 9 et 10 en utilisant la bille

6.4.1.2. Résultats obtenus lors des essais de tomographie

Concernant les essais de tomographie, pour toutes les positions émetteur-récepteur une courbe de dispersion a été construite. Ces courbes sont identifiées par le numéro de la série d'essai suivi de deux chiffres. Le premier chiffre correspond au numéro de la position du *déclencheur* sur le coté Est dans le cas de la première série ou coté Nord du carré pour la deuxième série et le second chiffre indique le numéro du récepteur. Par exemple pour la courbe identifiée par *série 2 4-2*, celle-ci correspond à la courbe de dispersion obtenue lors de la deuxième série d'essai entre le déclencheur placée à sa position 4 et le récepteur 2, le récepteur 1 étant en fait le *déclencheur*.

Les figures 6.17 et 6.18 illustrent quelques courbes de dispersion obtenues lors des essais de tomographie associée à l'ASOS. L'interprétation de ces courbes est identique à celle obtenue pour le chaînage 0+009 m. Les courbes ont des allures très semblables avec une vitesse qui augmente sensiblement pour des longueurs d'onde supérieures à 10-12 cm pour atteindre une valeur quasi constante pour des longueurs d'onde plus importantes. Les vitesses sont également très élevées et la vitesse moyenne pour les faibles longueurs d'onde est comprise entre 2300 m/s et 2500 m/s alors que la vitesse pour les grandes longueurs d'onde varie entre 2500 m/s et 2800 m/s. Ces vitesses sont légèrement inférieures à celles obtenues au chaînage 0+009. Ce résultat est probablement dû au fait que l'on a considéré une distance *SR* nulle pour les essais de tomographie. On constate également une grande régularité dans l'allure des courbes. Par contre, les valeurs des vitesses sont légèrement différentes entre les courbes. La distance *SR* nulle imposée pour l'essai de tomographie ne semble pas être un inconvénient pour l'application de la technique d'ASOS en chantier. La bille s'est avérée suffisante pour caractériser le béton de surface sur une profondeur comprise entre 10 et 50 cm.

Le résultat de la tomographie est illustré sur la figure 6.19. Le dessin représenté sur cette figure est une coupe de la zone auscultée par tomographie. Les vitesses les plus faibles sont représentées par la couleur violet foncé alors que les vitesses les plus élevées sont représentées par la couleur violet clair. Les vitesses intermédiaire sont représentées par la couleur rose. Le résultat de tomographie indique que les vitesses les plus faibles sont contenues dans l'intervalle de longueur d'onde compris entre 3 cm et 10 cm environ. Les vitesses les plus élevées sont obtenues pour des longueurs d'ondes supérieures à 35 cm. Quant aux longueurs d'ondes comprises entre 10 cm et 35 cm, leur vitesse est comprise entre celles des faibles longueurs

d'ondes et celles des grandes longueurs d'onde. Ceci indique que le béton de surface a des caractéristiques inférieures à celles du béton situé en profondeur et que la qualité du béton s'améliore pour des longueurs supérieures à 10 cm pour se stabiliser à une profondeur de l'ordre de 35 cm. Cependant ces mêmes constations ont déjà pu être faites avec les courbes de dispersion illustrées sur les figures 6.17 et 6.18. De ce fait, l'inversion des données avec le processus de tomographie n'apporte pas des informations supplémentaires relativement aux courbes de dispersion. Toutefois ce type de résultats permet de visualiser les variations de qualité dans le volume de matériau et estimer la quantité de matériau endommagé.

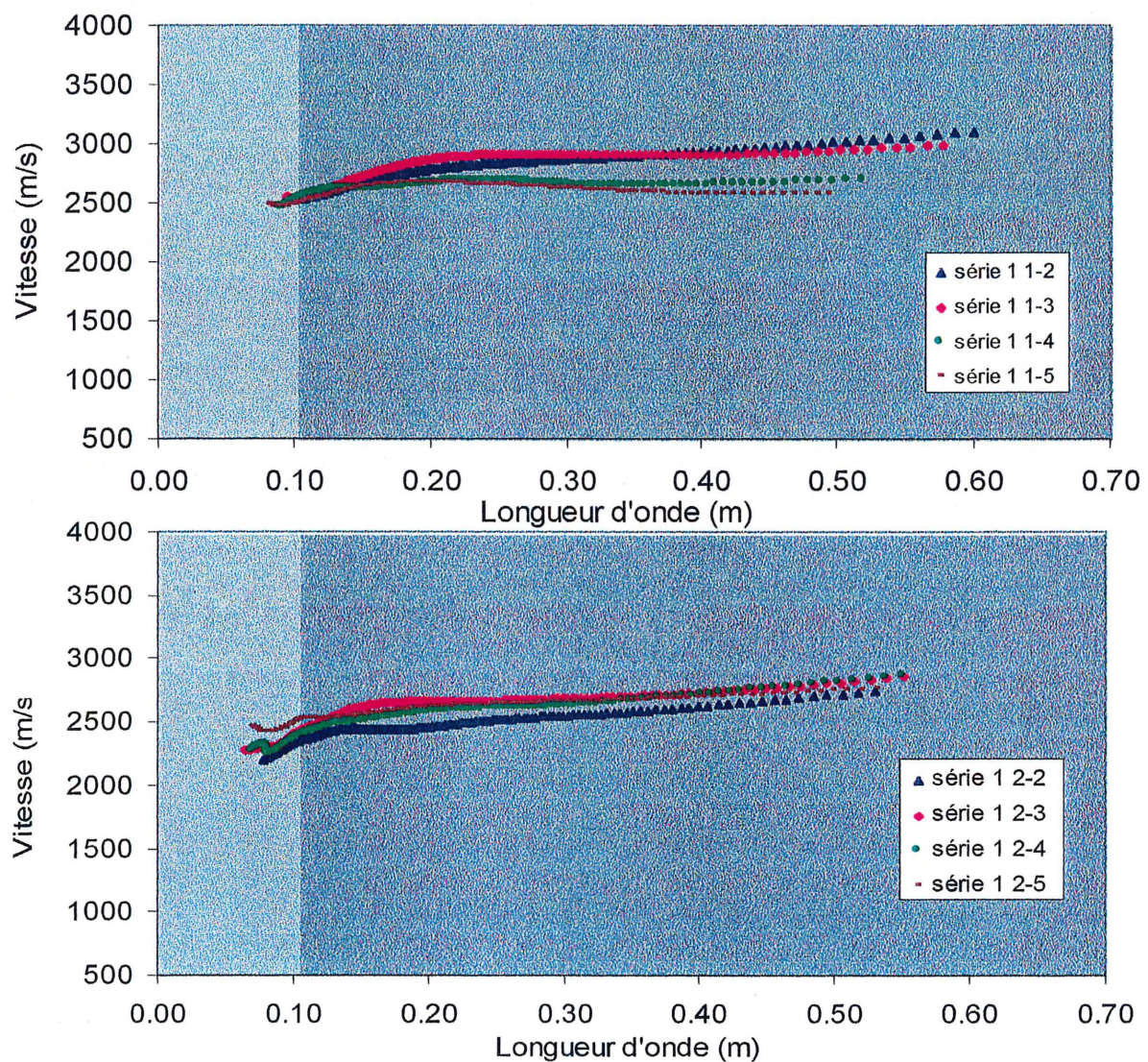


Figure 6.17 Courbes de dispersion obtenues lors des essais de tomographie pour la série 1, position 1 et 2 de la source

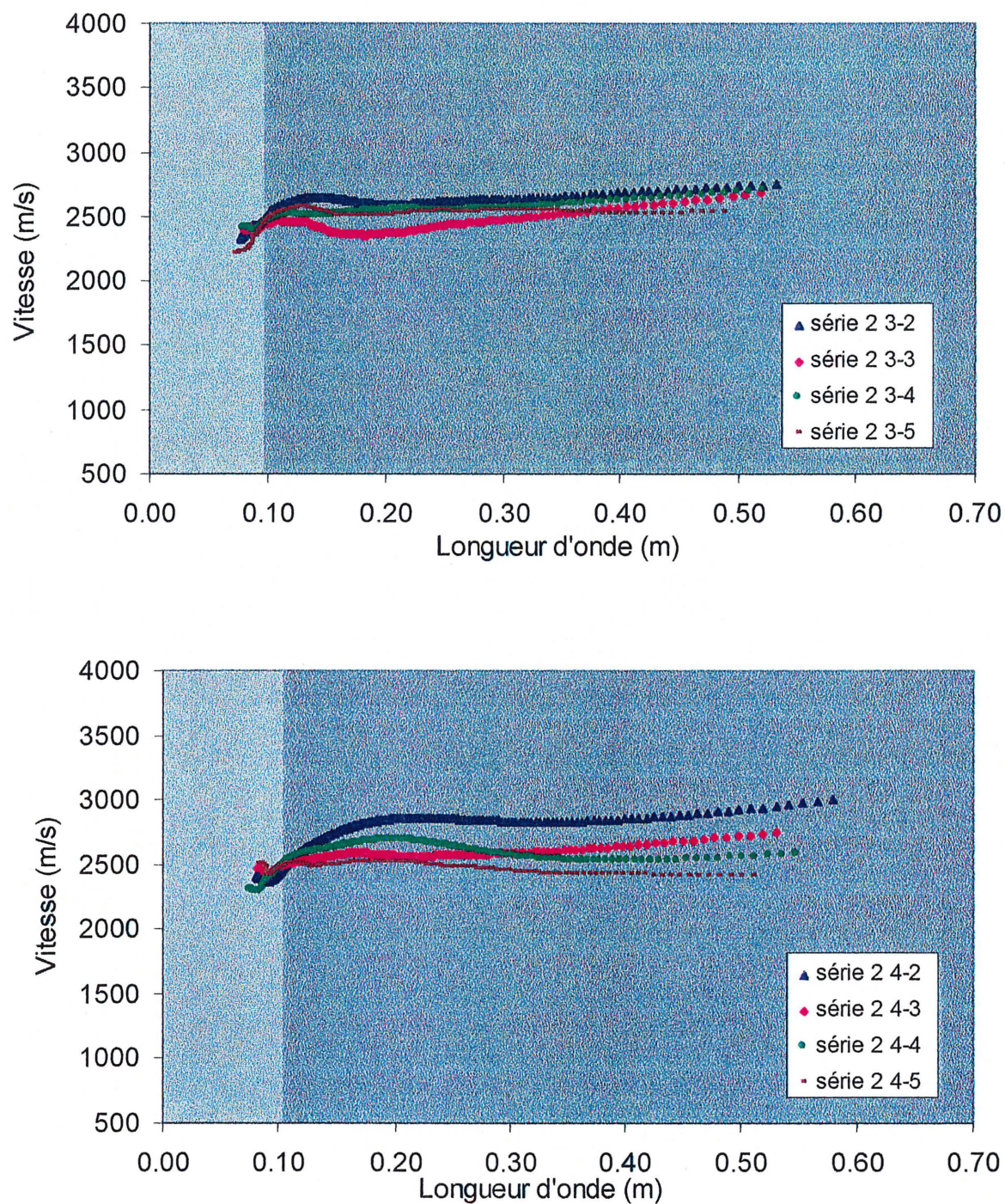


Figure 6.18 Courbes de dispersion obtenues lors des essais de tomographie pour la série 2, position 3 et 4 de la source

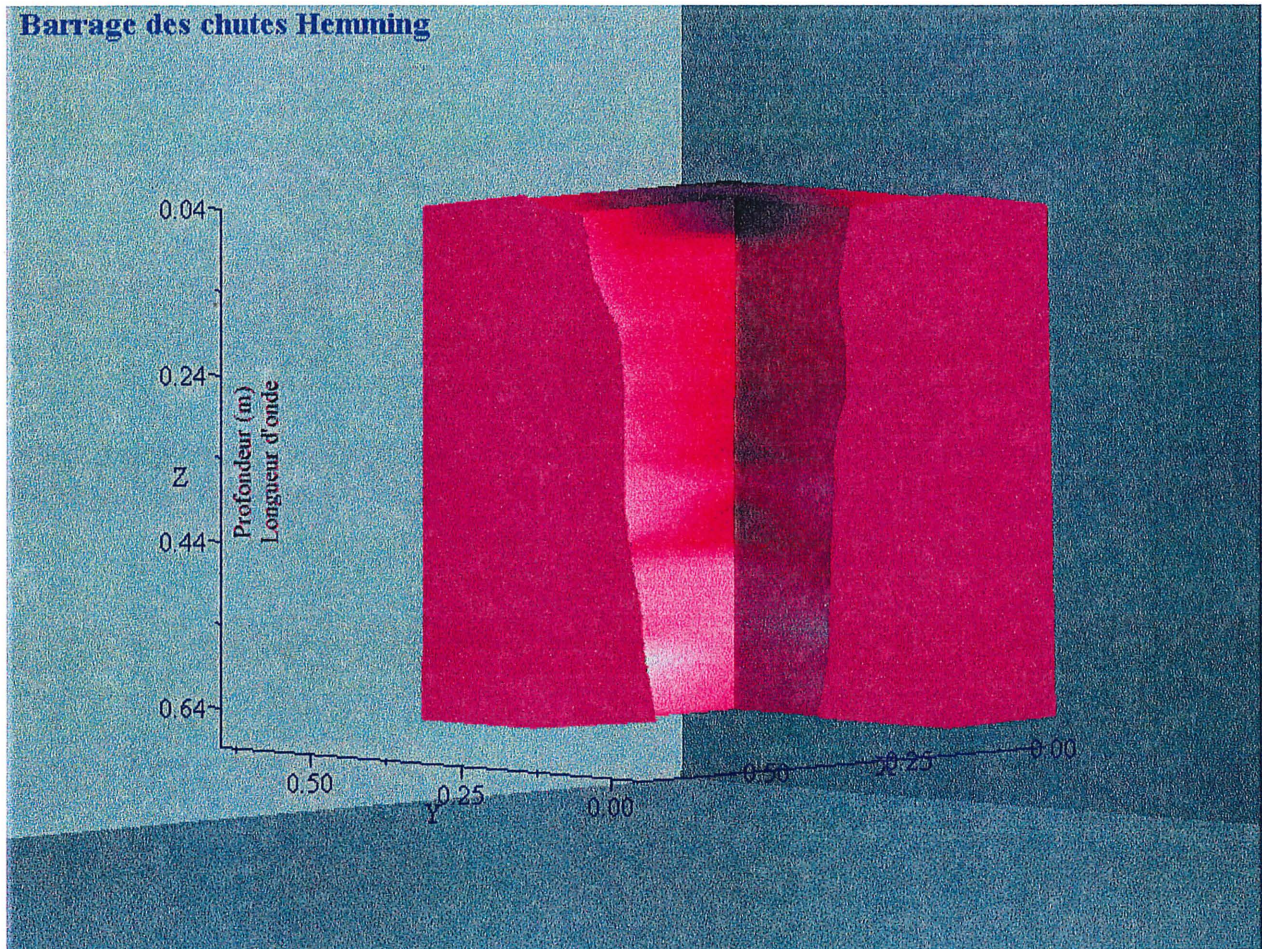


Figure 6.19 Vue en coupe du résultat des mesures de tomographie réalisées sur la face aval du barrage : l'échelle des vitesses varie de la couleur violet foncé (2200 m/s) à la couleur violet clair (2800 m/s), la couleur rose représente les vitesses intermédiaires

6.4.1.3. Synthèse des résultats

Les résultats des essais d'ASOS ont été présentés dans ce sous chapitre. Ces essais ont été réalisés pour suivre la variation de la vitesse de propagation des ondes de surface en fonction de la profondeur afin d'évaluer l'état de la structure.

De manière générale les courbes de dispersion ont donné des résultats similaires. Il a pu être établi que la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh est très élevée le long du chaînage et que la vitesse augmente avec la profondeur, notamment pour des longueurs d'ondes supérieures à 10-12 cm. Par contre, il n'a pas été détecté une variation de la qualité du béton en fonction de l'élévation. Quant aux courbes résultantes des essais de tomographie, leur allure est également

régulière et un gradient de vitesse entre les longueurs d'onde 10 et 12 cm distingue le béton de réparation du béton de masse. La vitesse de propagation dans le béton pour des longueurs d'ondes supérieures à 15 cm varie très peu et laisse supposer une qualité homogène du béton de masse.

La vitesse moyenne indique des valeurs élevées comprises entre 2400 m/s et 2800 m/s pour des longueurs d'onde comprises entre 8 cm et 65 cm. Les longueurs d'ondes inférieures à dix centimètres ont les vitesses les plus faibles. L'inspection visuelle de la structure avait permis de constater des fissures sur la face aval sur une profondeur de 10 à 30 mm. Par contre, les longueurs d'ondes considérées dans les courbes de dispersion n'ont pas permis d'obtenir des informations sur le béton très proche de la surface ($\lambda < 5$ cm) et donc sur les fissures de surface.

Les deux sources utilisées ont permis d'évaluer le béton sur des intervalles de longueurs d'ondes différents. La bille permet de générer des longueurs d'ondes plus faibles que le marteau. D'autre part, la bille est plus facile à manipuler et elle est mieux adaptée pour des essais d'ASOS sur des structures en béton. Néanmoins, il serait intéressant de disposer d'une source favorisant les ondes plus hautes fréquences afin de pouvoir évaluer la qualité du béton sur les 5 à 8 premiers centimètres qui n'ont pas été atteint avec la bille et le marteau lors de ces essais.

Tel que constaté en laboratoire, la distance SR a peu d'influence sur l'allure des courbes de dispersion. L'application de la tomographie en chantier a montré qu'une distance SR nulle permet également d'obtenir des courbes de dispersion significatives et d'estimer la qualité du béton. Le résultat des mesures de tomographie n'apporte pas d'informations supplémentaires relativement aux courbes de dispersion. Il permet de mieux visualiser le résultat et peut être applicable à la localisation spatiale des zones de faiblesses.

Cette expérience de chantier montre que la technique d'analyse spectrale des ondes de surface est adaptée pour donner un état général de la qualité du béton. L'allure générale des courbes permet de distinguer la couche de béton endommagé et de suivre la variation de la qualité du béton avec la profondeur sans toutefois reconnaître les défauts de fissuration en surface (sur 30 mm de profondeur).

6.4.2. Résultats des travaux de laboratoire

Les carottes A, B et C de longueurs respectives 0,84 m, 0,83 m et 0,74 m, ont été récupérées en plusieurs morceaux (Figure 6.9). Chacun des morceaux a été identifié par une lettre correspondant à la carotte d'origine et un chiffre indiquant le numéro du morceau. Par exemple le premier morceau de la carotte A, à partir de la surface, a été identifié par A1. Les caractéristiques des 3 carottes prélevées du barrage sont données dans le tableau 6.2. La profondeur représente l'intervalle de profondeur où les différents morceaux ont été extraits. Les carottes de béton ont été conservées dans un milieu sec et les essais ont été réalisés moins de 7 jours après le carottage.

Tableau 6.2 Caractéristiques des carottes prélevées sur la cloison gauche

Carottes ⁽¹⁾	Échantillon	Profondeur (m)	Remarques ⁽²⁾
A	A1	0-0,1	Béton de réparation
	A2	0,1-0,2	$\phi = 60$ mm
	A3	0,2-0,32	$\phi = 60$ mm
	A4	0,32-0,6	$\phi = 80$ mm
	A5	0,6-0,84	$\phi = 80$ mm
C	C1	0-0,12	Béton de réparation
	C2	0,12-0,15	$\phi = 40$ mm
	C3	0,15-0,2	$\phi = 60$ mm
	C4	0,2-0,83	$\phi = 80$ mm
B	B1	0-0,09	Béton de réparation
	B2	0,12-0,43	$\phi = 80$ mm
	B3	0,43-0,74	$\phi = 80$ mm

⁽¹⁾ le diamètre des carottes est de 100 mm.

⁽²⁾ ϕ est le diamètre maximal du gros granulat

6.4.2.1. Évaluation visuelle

Une fissure qui correspond au décollement du béton de surface a été relevée sur les 3 carottes. Le béton de réparation s'est distingué par sa granulométrie assez fine (inférieure à 20 mm)

relativement au béton de masse dont la granulométrie était plus importante comme l'illustre la figure 6.20. Le béton de réparation était de bonne qualité sur les 3 carottes et son épaisseur variait entre 9 et 12 cm. Quant au béton de masse, il était quelque peu dégradé sur les cinq premiers centimètres et plusieurs petites fissures ont été relevées. Par contre, il n'y a aucune adhérence entre le béton de réparation et le béton de masse, ce qui n'a pas toujours été révélée par les sondages par martelage.

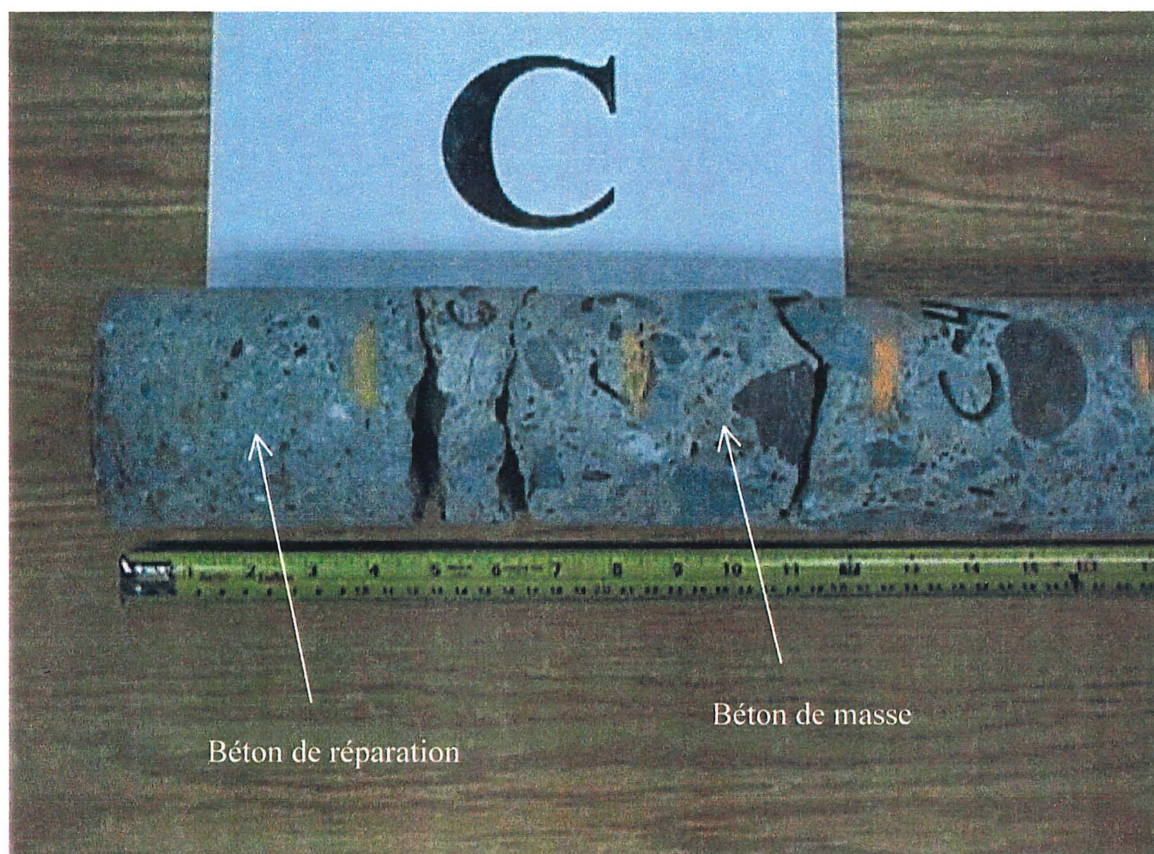


Figure 6.20 Vu du béton de réparation et du béton de masse

De manière générale, tel que constaté par le laboratoire Shermont (Rapport d'investigation du barrage Chutes Hemming, Les laboratoires Shermont INC., 1994), la qualité des bétons projeté et de masse était bonne et les fissures relevées à la surface sont peu profondes. Peu de ségrégation a été constatée dans la distribution du gros granulat et peu de fissuration a été relevée dans le béton de masse. L'adhérence pâte/granulats était plutôt bonne.

6.4.2.2. Essai sonique

Les essais soniques exigent des échantillons de béton ayant des surfaces lisses et parallèles. Pour cela un surfacage a été nécessaire. Auparavant les carottes ont été découpées afin d'obtenir des échantillons ayant des longueurs proches de 200 mm lorsque cela était possible. Les échantillons de longueurs inférieures à 60 mm n'ont pas été considérés pour cet essai. Concernant l'interprétation des résultats de l'essai, il faut porter une attention particulière à la taille des granulats qui est différente entre le béton de réparation et le béton de masse.

Les résultats des essais soniques sont regroupés dans le tableau 6.3. Les échantillons dont les résultats n'apparaissent pas dans le tableau avaient soit une longueur trop faible (inférieur à 60 mm) ou soit ils ont été détériorés lors du surfacage. Le second chiffre d'identification d'un échantillon correspond au numéro de l'échantillon prélevé du morceau de carotte identifié par la lettre et le premier chiffre.

Tableau 6.3 Résultats des essais soniques

Échantillon	Longueur (cm)	$V_P^{(1)}$ (m/s)	$V_S^{(1)}$ (m/s)	$V_R^{(2)}$ (m/s)	$E_D^{(3)}$ (GPa)
A1	6,2	4895	2700	2450	46
A4	20,5	5025	2948	2680	54
A5	17,8	4750	2979	2700	52
B1	8,3	4710	2690	2440	44
B2	20,2	4760	2910	2640	50
B3-1	20,7	4750	2720	2470	47
B3-2	10,5	4840	2800	2550	48
C1	10	4570	2880	2610	47
C4-2	20,5	4830	3060	2780	55
C4-3	11,5	4780	2780	2530	47

⁽¹⁾ vitesse des ondes de volume P et S

⁽²⁾ vitesse des ondes de Rayleigh calculée à partir de la relation 3-4

⁽³⁾ module d'élasticité dynamique

L'essai sonique permet de distinguer la qualité du béton suivant cinq classes en fonction de la vitesse de propagation des ondes P comme l'indique le tableau 6.4.

La vitesse de propagation de l'onde P varie entre 4750 m/s et 5025 m/s pour les différents échantillons. Au vu du tableau 6.4 les échantillons peuvent être considérés en excellent état. Cette qualité reste intrinsèque à l'échantillon et ne représente pas une qualité générale du béton puisque les fissures présentes dans la structure ne sont pas prises en compte dans cet essai. Les différences de vitesse entre les 3 carottes ne sont pas très importantes et pour une même carotte on ne relève pas de variation considérable de la vitesse en fonction de la profondeur, notamment dans le béton de masse.

Tableau 6.4 Classification du béton en fonction de la vitesse (source : Hydro Québec)

Classification du béton	Vitesse de l'onde P (m/s)
Excellent	> 4500
Bon à très bon	3650-4500
Douteux	3050-3650
Pauvre	2000-3050
Très pauvre	0-2000

Les vitesses moyennes de l'onde P et S dans le béton projeté peuvent être estimées respectivement à 4700 m/s et 2750 m/s et celle dans le béton de masse à 4800 m/s et 2900 m/s. La disparité des vitesses dans le béton de masse est moindre pour les ondes S relativement aux ondes P. Les ondes S sont reconnues pour être plus sensibles à la qualité du milieu de propagation que les ondes P. La vitesse moyenne de propagation des ondes S, plus élevée dans le béton de masse, pourrait signifier une qualité supérieure. De manière générale, la vitesse des ondes S est très élevée pour les deux bétons et confirme l'excellente qualité du béton. Ces vitesses de propagation élevées sont certainement due au fait que le béton du barrage a été fortement compactés lors de sa mise en place et aussi au fait que le béton de masse contient des gros granulats.

La vitesse de propagation des ondes de Rayleigh peut également être déterminée à partir de la vitesse des ondes S en multipliant cette vitesse par un facteur qui est fonction du coefficient de

poisson. Ce facteur a une valeur moyenne de 0,91 lorsque le coefficient de poisson varie entre 0,15 et 0,25, ce qui est le cas du béton. On obtient une vitesse moyenne des ondes de Rayleigh de 2500 m/s pour le béton projeté et de 2600 m/s pour le béton de masse. Ces vitesses sont très élevées comparativement à celle déterminées sur les cubes de béton testés en laboratoire. Lors de ces essais, la vitesse des ondes de Rayleigh variait entre 1900 m/s et 2350 m/s respectivement pour le mauvais béton et le bon béton.

Concernant le module d'élasticité dynamique, les valeurs obtenues sont également élevées. Comme pour les valeurs des vitesses, le module ne varie pas significativement entre les carottes pour le béton projeté ou de masse. La valeur moyenne du module est de 45 GPa pour le béton projeté et de 50 GPa pour le béton de masse.

6.4.2.3. Essais mécaniques

Les essais de mesure du module d'élasticité ont été effectués sur les échantillons dont la longueur était proche de 200 mm afin d'avoir un rapport longueur sur diamètre de deux. Les essais de résistance à la compression ont été réalisés sur les mêmes échantillons que ceux utilisés pour le module d'élasticité. Les résultats sont présentés dans le tableau 6.5.

Les modules d'élasticité déterminés pour les différents échantillons ont des valeurs élevées comprises entre 32 GPa et 39 GPa. Les propriétés mécaniques (module d'élasticité et résistance à la compression) du béton de masse ne varient pas sensiblement d'une carotte à une autre. Par contre la différence entre les modules d'élasticité dynamiques et statiques est importante. La taille élevée des granulats peut expliquer cette grande différence des valeurs de modules.

Les résistances varient entre 30 MPa et 39 MPa pour le béton de masse. La résistance la plus faible a également été obtenue sur l'échantillon présentant le module le plus faible. De manière générale, le béton de masse présente une qualité uniforme et il est de bonne qualité compte tenu de sa résistance à la compression et de son module d'élasticité mécanique.

Tableau 6.5 Récapitulatifs des résultats obtenus en laboratoire

Échantillon	Longueur (cm)	Profondeur (m)	f'_c ⁽¹⁾ (MPa)	E_s ⁽²⁾ (GPa)	E_D ⁽³⁾ (GPa)
A1	6,2	0-0,1	****	****	46
A4	20,5	0,32-0,6	40	36	54
A5	17,8	0,6-0,84	31	32	52
B1	8,3	0-0,09	****	****	44
B2	20,2	0,12-0,43	35	35	50
B3-1	20,7	0,44-0,64	35	****	47
B3-2	10,5	0,64-0,74	****	****	48
C1	10	0-0,12	****	****	47
C4-2	20,5	0,45-0,65	39	39	55
C4-3	11,5	0,68-0,81	****	****	47

⁽¹⁾ *résistance à la compression*

⁽²⁾ *module d'élasticité statique*

⁽³⁾ *module d'élasticité dynamique*

6.4.3. Interprétations de l'ensemble des résultats

Ce chapitre a pour but d'évaluer la qualité du béton d'une structure par des essais d'ASOS et de comparer les conclusions avec les résultats d'essais mécaniques en laboratoire.

Les travaux de laboratoire ont permis d'évaluer la qualité du béton en des endroits précis, soit sur le lieu de prélèvement des carottes. De ces essais, il apparaît que le béton est composé d'une première couche de béton projeté qui est décollée du béton de masse. L'analyse spectrale a été capable de distinguer cette première couche et de situer sa profondeur entre 10 et 12 cm environ. Par contre au vu des courbes de dispersion il est difficile de prédire un décollement du béton projeté mais seulement de préciser que les deux bétons présentent des qualités différentes.

Les essais mécaniques ont également révélé une excellente qualité du béton de masse. D'autres part celle-ci varie très peu en profondeur. Les courbes de dispersion ont donné des vitesses de

propagation très élevées, ce qui montre que le béton est de bonne qualité. La vitesse augmente pour des profondeurs comprises entre 10 et 15 cm, ce qui correspond à la zone de transition entre le béton projeté et le béton de masse. Par contre, la vitesse varie très peu pour les grandes longueurs d'ondes (supérieures à 15 cm) qui se propagent essentiellement dans le béton de masse. Cela confirme l'homogénéité de la qualité du béton de masse suivant la profondeur, constaté lors des travaux de laboratoire.

Les valeurs élevées de vitesses de propagation des ondes de Rayleigh obtenues avec les essais d'auscultation ont été confirmées par les résultats de l'essai sonique avec des vitesses moyennes de 2400 m/s environ pour le béton projeté et entre 2600 m/s et 2800 m/s pour le béton de masse.

6.5. Conclusion

Les essais entrepris sur le site ont été concluants et surtout très instructifs. L'application d'une technique développée en laboratoire sous des conditions contrôlées n'est jamais aisée sur chantier et l'utilisateur est souvent confronté à des difficultés d'ordre pratiques. Dans le cas de cette étude, la plus grande difficulté a été l'interprétation des valeurs élevées de vitesses de propagations des ondes de Rayleigh dans le béton qui ont pu être confirmées par les essais de laboratoire. Les vitesses élevées obtenues sur les courbes de dispersion correspondent effectivement à un module d'élasticité élevé, tel que déterminé par les essais de laboratoire. Il ne faut donc pas être surpris d'obtenir des vitesses de propagation des ondes de Rayleigh supérieure à 2500 m/s sur une structure en béton

La technique utilisée a permis d'établir une évaluation de la qualité du béton très proche de celle des essais de laboratoire. L'analyse spectrale montre un potentiel réel à décrire l'état interne du béton et à délimiter les dommages. Par contre, elle est plus apte à décrire l'état général du béton de la structure que son état en un point précis. Cela confirme les conclusions de Kalinski (1994) qui, lors de l'investigation d'une poutre de pont en béton, avait conclu que les informations apportées par l'ASOS peuvent être utilisées pour confirmer et délimiter des zones endommagées, initialement identifiées par une inspection visuelle. Dans ce cas-ci, les courbes de dispersion ont permis de définir la qualité du béton en identifiant les zones de béton réparées et en précisant l'épaisseur du béton de réparation. Cependant, l'utilisation de la technique d'ASOS ne doit pas éliminer les essais de laboratoire (essais mécaniques) afin de vérifier et d'appuyer les résultats

des essais de chantier. Toutefois, le nombre de carottes à prélever sera moins important et les essais ne seront qu'un complément de l'utilisation de l'ASOS.

Concernant la procédure, celle-ci a été validée sur une structure en service : la bille C ainsi que l'utilisation d'une distance entre source et premier récepteur nulle ont été satisfaisants. D'autre part, ces essais de chantier ont permis de confirmer que les propriétés de la première couche d'une structure en béton ont une influence sur une profondeur égale à environ une longueur d'onde

La technique d'auscultation présente également l'avantage d'être un outil non-destructif qui peut être utilisé autant de fois que l'on désire à plusieurs endroits de la structure sans détruire le béton. Il est également possible de suivre l'évolution de l'état du béton avec le temps en auscultant le même béton. Un autre avantage de la technique est la possibilité de traiter les données et de décrire les courbes de dispersion sur le chantier en utilisant le programme de traitement des signaux développé dans le cadre de cette étude.

Enfin, l'application de la tomographie aux données de l'ASOS a été validée. Ce type de traitement peut être très pertinent pour la localisation en trois dimensions des défauts contenus dans le béton (vide, ...).

CONCLUSION

L'étude réalisée dans le cadre de cette maîtrise concerne l'application de la technique d'ASOS pour l'évaluation de la qualité de la peau du béton. Cette étude comprend essentiellement deux parties. La première décrit les essais effectués en laboratoire et la seconde a eu pour but d'appliquer la technique développée en laboratoire sur une structure en service. À la suite de ces essais, les conclusions suivantes sont dégagées:

- La propagation des ondes de Rayleigh est sensible à la qualité du béton ainsi qu'à sa ségrégation. Il est possible d'associer une vitesse de propagation des ondes de Rayleigh à une qualité donnée de béton. Les vitesses déterminées en laboratoire oscillent entre 1900 m/s pour un béton de 17 MPa de résistance et 24 GPa de module d'élasticité et 2350 m/s pour un béton à haute performance (BHP) de 53 MPa de résistance et 35 GPa de module d'élasticité. D'autre part, une estimation réaliste des modules d'élasticité des trois bétons a pu être obtenue à partir des vitesses de propagation des ondes de Rayleigh.
- La comparaison des vitesses de propagation des ondes de compression et des ondes de Rayleigh obtenues sur les blocs homogènes a révélé que ces dernières étaient plus sensibles à la variation de la qualité du béton.
- Les essais réalisés sur le bloc multicouche ont montré que la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh est affectée par les propriétés du béton sur une profondeur équivalente à une longueur d'onde. Par conséquent, il est possible de déterminer la frontière entre deux couches de béton de qualités mécaniques différentes et d'estimer l'épaisseur et la qualité du béton de surface avec une précision de l'ordre de 2 à 3 cm.
- La technique s'est avérée capable de détecter la présence d'une discontinuité dans le béton. D'autre part, une discontinuité de surface a un effet plus important sur le résultat relativement à une discontinuité située plus en profondeur. Aussi, les courbes de dispersion ne sont pas affectées par l'orientation de la discontinuité (verticale ou horizontale). Les seuls paramètres qui influencent les courbes de dispersion sont la profondeur du défaut et la distance entre récepteurs.

- La présence des réflexions dans les signaux enregistrés à la surface du béton a des effets importants sur les résultats. Une fenêtre doit être utilisée pour atténuer les réflexions. Cependant, il est très important de considérer une fenêtre qui n'apporte pas de modifications majeures sur le train d'onde de Rayleigh. Par contre, l'élimination des ondes de compression n'a pas une grande influence sur les résultats et il n'est donc pas nécessaire de les filtrer.
- Les trois fenêtres utilisées (exponentielle modifiée, kaiser et multiplication du signal par lui-même) ont montré qu'il est possible d'éliminer les réflexions et d'obtenir des courbes de dispersion représentatives du milieu. D'autres part, les résultats sont indépendants du type de fenêtre. Toutefois, il est préférable d'utiliser plusieurs fenêtres afin de comparer les courbes et de s'assurer du résultat.
- Les travaux de laboratoire ont montré qu'il ne faut pas considérer toutes les longueurs d'ondes lors de l'interprétation des courbes de dispersion. À la suite des essais réalisés sur trois blocs en béton de qualités différentes, un critère de sélection des longueurs d'onde a été établi. Ce critère de sélection des longueurs d'onde considère que seul l'intervalle de longueurs d'onde correspondant à un intervalle de fréquences dont l'énergie est supérieure à 20% de l'énergie maximale du spectre d'amplitude est significatif.
- Le critère de sélection des longueurs d'onde retenu est indépendant de la qualité du béton et de la disposition des récepteurs (distance entre récepteurs et distance source-premier récepteur).
- L'étude de l'influence des paramètres d'essai a montré que l'allure des courbes de dispersion est conservée quelle que soit la distance RR et SR . Néanmoins, la vitesse moyenne des courbes de dispersion diminue légèrement avec la distance SR . Il est donc possible d'évaluer la qualité du béton en considérant une distance SR nulle. Toutefois, il est important de comparer les résultats obtenus sur les différents bétons en considérant une même distance SR .
- Concernant l'influence de la source, quatre billes de diamètres différents et un marteau ont été utilisés. Les sources de faible diamètre ont tendance à créer des ondes de faibles longueurs d'ondes alors que les sources de diamètre plus important génèrent des longueurs d'ondes plus grandes.

➤ La combinaison des courbes de dispersion obtenues avec la bille C ($\phi=13$ mm) et le marteau a permis d'augmenter l'intervalle de longueur d'onde considéré. Toutefois, aucune des sources utilisées n'a permis d'atteindre des longueurs d'ondes inférieures à 7 cm. D'autre part, la bille C ($\phi = 13$ mm) est suffisante pour ausculter le béton sur une profondeur inférieure à 30 cm environ.

Les essais sur chantier ont permis d'appliquer la technique d'ASOS sur un barrage poids. Les essais réalisés avec des techniques dites «traditionnelles» (essai de compression et de module d'élasticité, essai sonique) ont permis de comparer les résultats. Il en ressort de ces investigations différents points qui sont exposés ci-dessous.

➤ L'ASOS est capable d'établir une évaluation de la qualité du béton très proche de celle des techniques dites «traditionnelles».

➤ Les courbes de dispersion permettent de définir la qualité général du béton en identifiant les zones potentielles de béton à réparer et de donner un ordre de grandeur de l'épaisseur du béton de réparation ou du béton de surface. Toutefois quelques carottages sont nécessaires pour la validation des résultats.

➤ Quant à la procédure établie en laboratoire, elle s'est avérée satisfaisante pour des essais en chantier.

Il a été démontré qu'il est possible de combiner l'ASOS au concept de tomographie pour la représentation, en trois dimensions, des variations de la qualité du béton. Ce nouveau procédé est particulièrement utile pour l'estimation de la quantité de béton à réparer et a un potentiel pour déclencher la décision de procéder à la réparation d'un élément en béton.

Enfin, il est nécessaire de procéder à l'évaluation d'autres structures existantes pour confirmer le degrés de précision d'un diagnostic basé sur la technique d'ASOS.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Caractéristiques des mélanges de béton et des modèles

Tableau A1-1 Caractéristiques des mélanges de béton à l'état frais lors de la fabrication des -modèles

	Mélange 1	Mélange 2	Mélange 3
	Type 10 260	Type 10 290	HSF 400
Ciment (kg/m^3)			
Eau (kg/m^3)	208	189	160
E/L	0,8	0,65	0,4
Sable (kg/m^3)	1050	925	705
Granulat (kg/m^3)	850	975	1040
Agent entraîneur d'air (ml/100 kg de ciment)	40	--	--
Superplastifiant (l/m^3)	--	--	3,8
Masse volumique (kg/m^3)	2254	2352	2414
Air (%)	5,2	1,7	1,4
Affaissement (mm)	215	160	150

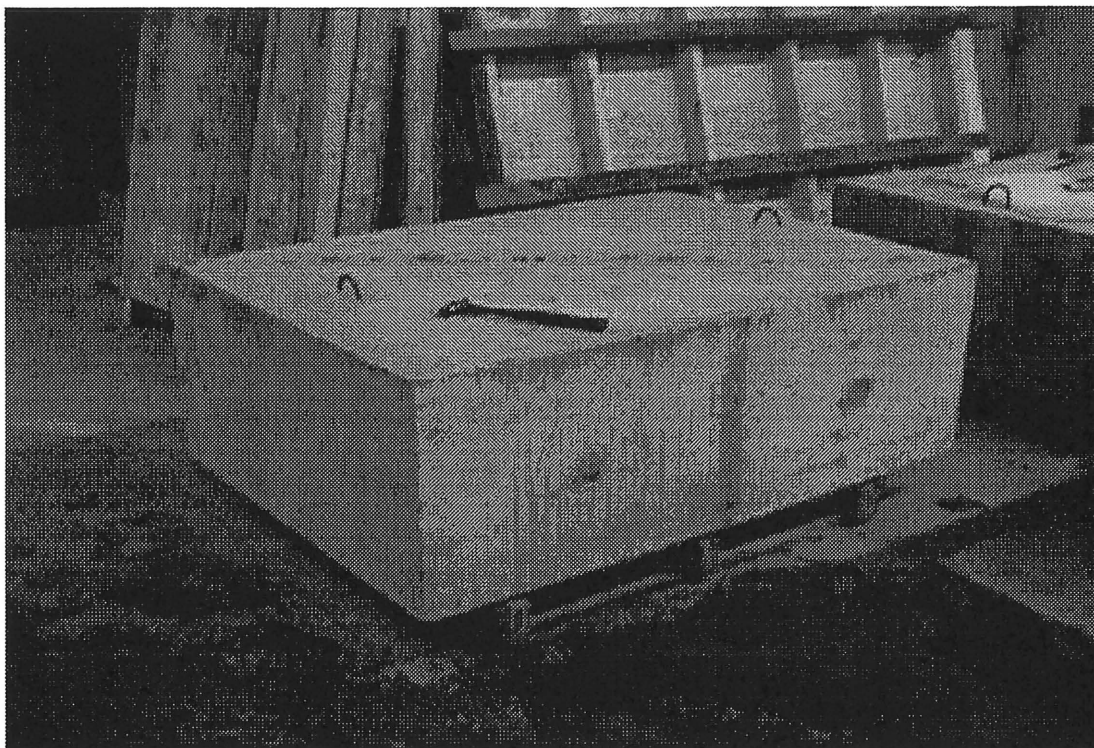


Figure A1-1 Cube homogène

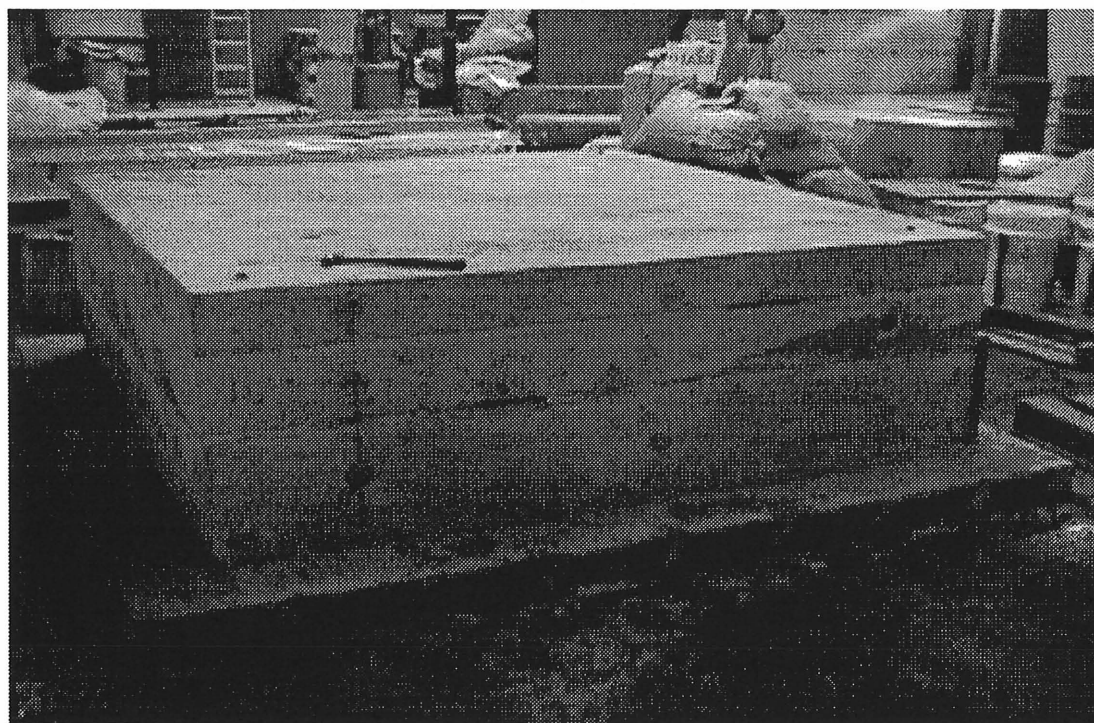


Figure A1-2 Cube multicouche

ANNEXE 2 : Le logiciel de traitement de données

Après l'enregistrement des signaux, le logiciel de traitement "SASW" est utilisé pour le traitement des signaux. Le démarrage de ce programme permet d'avoir l'écran de la figure A2-1.

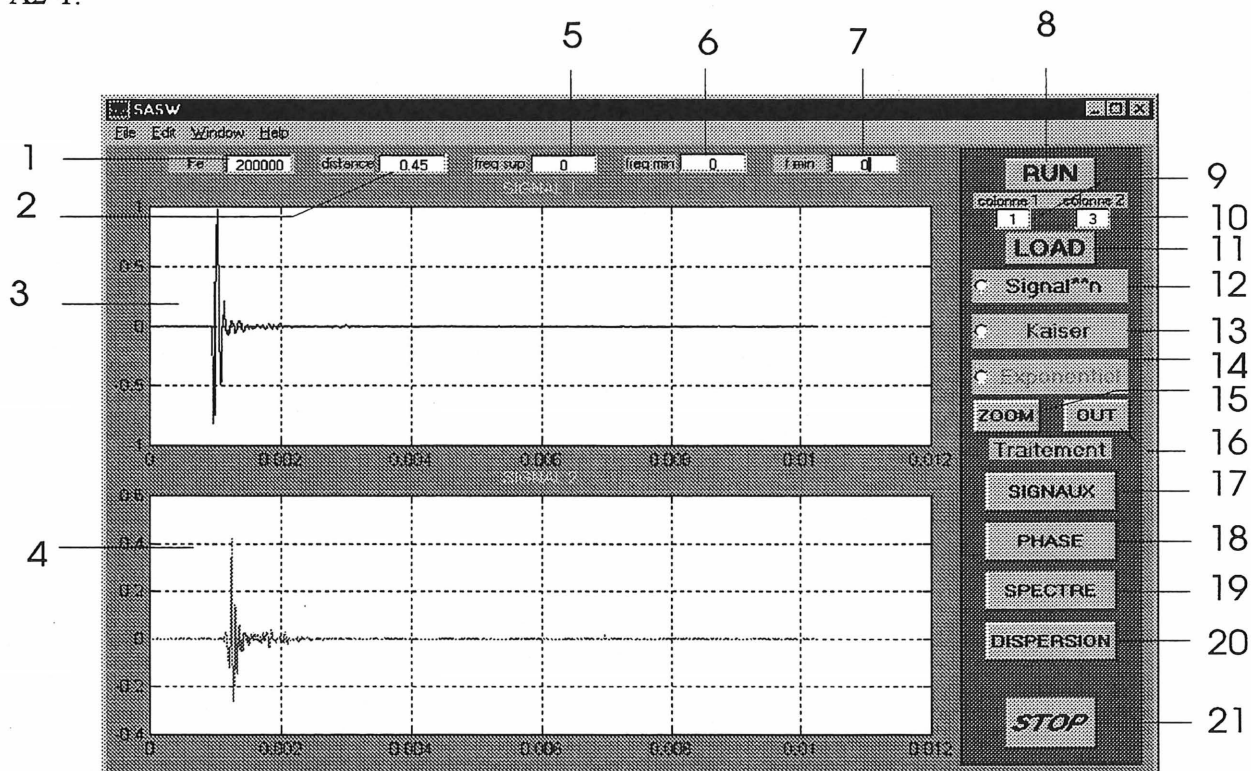


Figure A2-1 Visualisation des signaux à traiter

Signification des différents éléments de cet écran

- 1 Fréquence d'échantillonnage (200kHz)
 - 2 Distance entre les capteurs
 - 3 Fenêtre montrant le signal du 1^{er} capteur
 - 4 Fenêtre montrant le signal du 2^{er} capteur
 - 5,6 Bornes supérieure et inférieure de la bande de fréquence sélectionnée
 - 7 Fréquence à partir de laquelle le spectre de phase est déroulé
 - 8 Bouton permettant de lancer le programme
 - 9 Première colonne des données
 - 10 Deuxième colonne des données (pour le premier signal, utiliser les colonnes 1 et 2; pour le deuxième signal, utiliser les colonnes 3 et 4 etc. Les deux dernières colonnes contiennent la moyenne des données des signaux enregistrées.
 - 11 Permet de charger les données à traiter.
- Les signaux montrés dans la figure 2 montrent des reflétions et nécessitent un filtrage:
- 12 Filtre 1: multiplication du signal par lui même
 - 13 Filtre 2: "Kaiser" en cloche
 - 14 Filtre 3: exponentiel

- Il faut noter que pour chaque type de filtre, il en existe plusieurs avec des paramètres différents.
- 15 Permet de faire un zoom sur le signal
 - 16 Permet de revenir la fenêtre standard (avant le zoom)
 - 17 Ce bouton permet de visualiser les signaux avant et après filtrage comme le montre la figure A2-2.

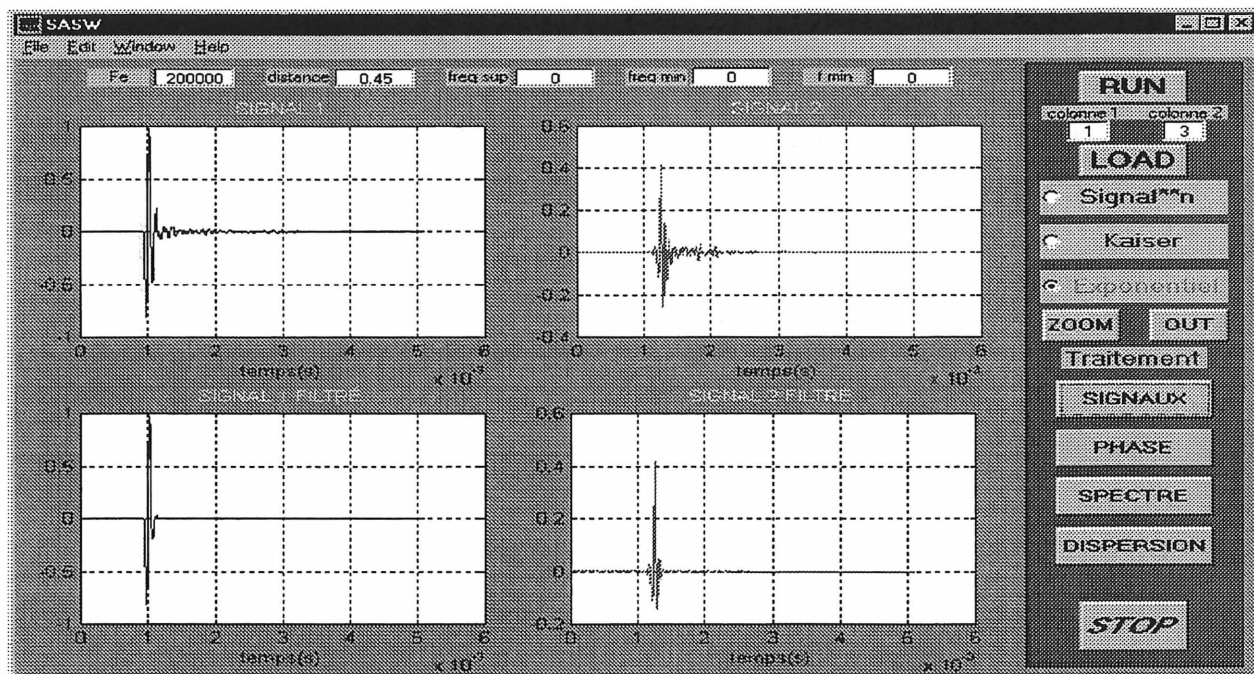


Figure A2-2 Visualisation des signaux non filtrés et filtrés

- 18 Permet de visualiser le spectre de phase des signaux filtrés et non filtrés comme le montre la figure A2-3
- 19 Permet de visualiser les spectres en fréquence d'amplitude de l'interspectre des signaux non filtrés et filtrés comme le montre la figure A2-4.

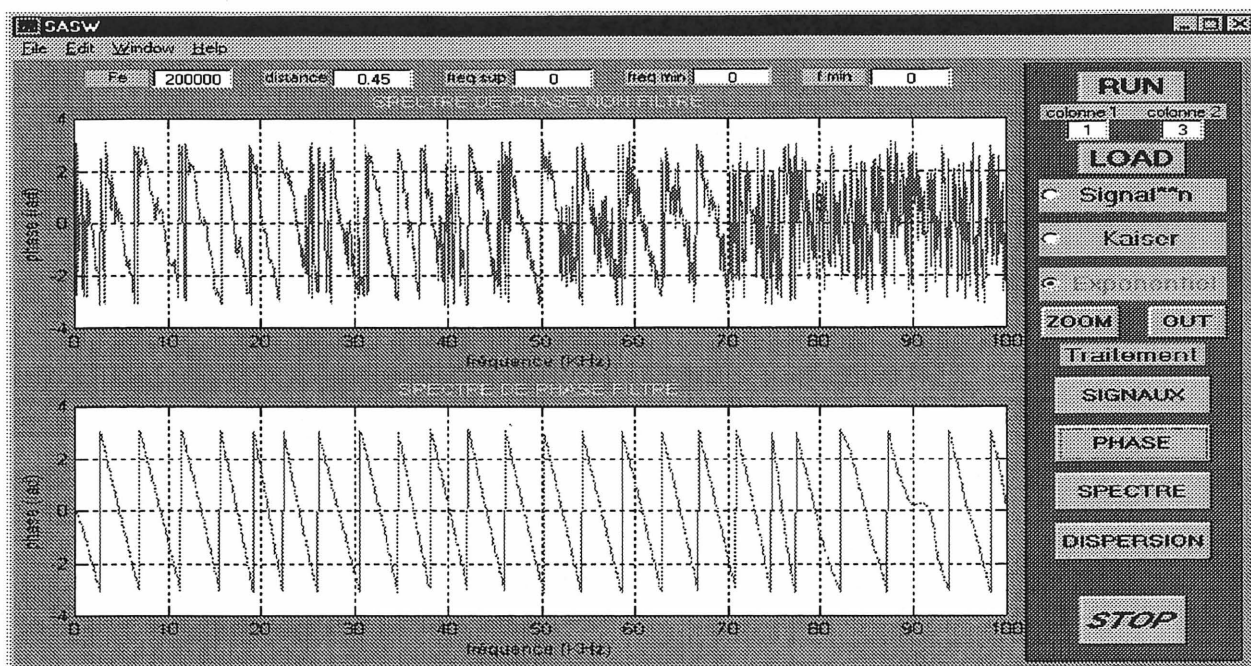


Figure A2-3 Spectre en fréquence d'amplitude de l'interspectre des signaux non filtrés et filtrés

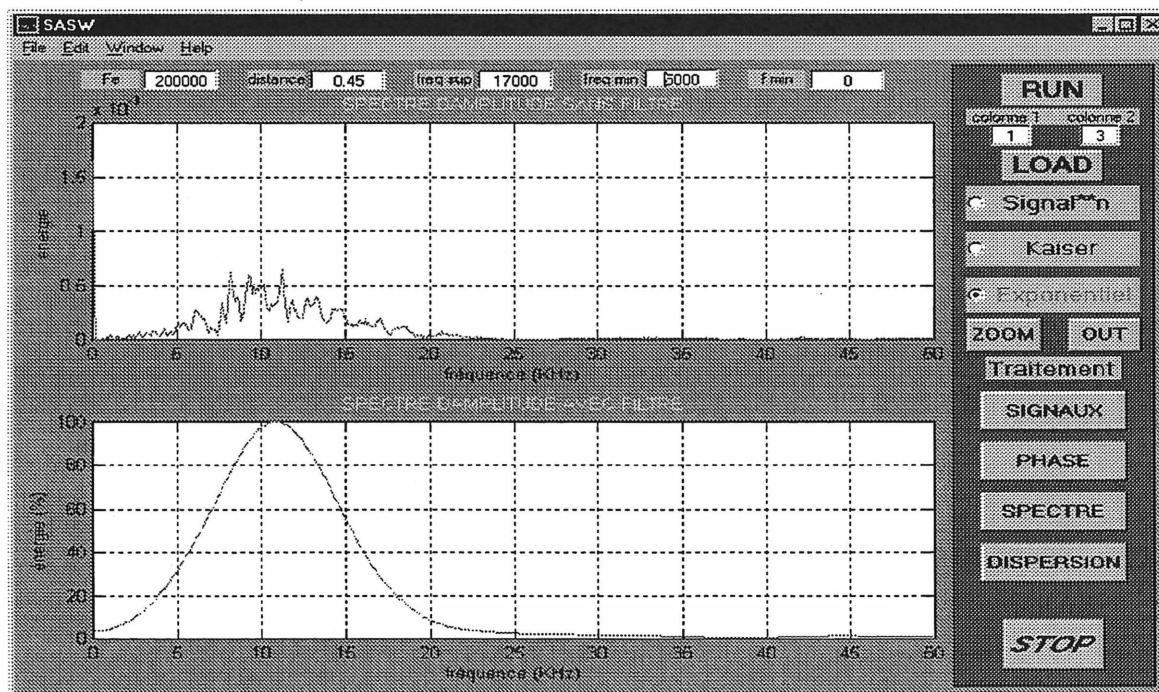


Figure A2-4 Spectre d'amplitude de l'interspectre des signaux non filtrés et filtrés

- 20 Permet de visualiser la variation de la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh en fonction de la fréquence ainsi que la courbe de dispersion (vitesse vs longueur d'onde) Figure A2-5.

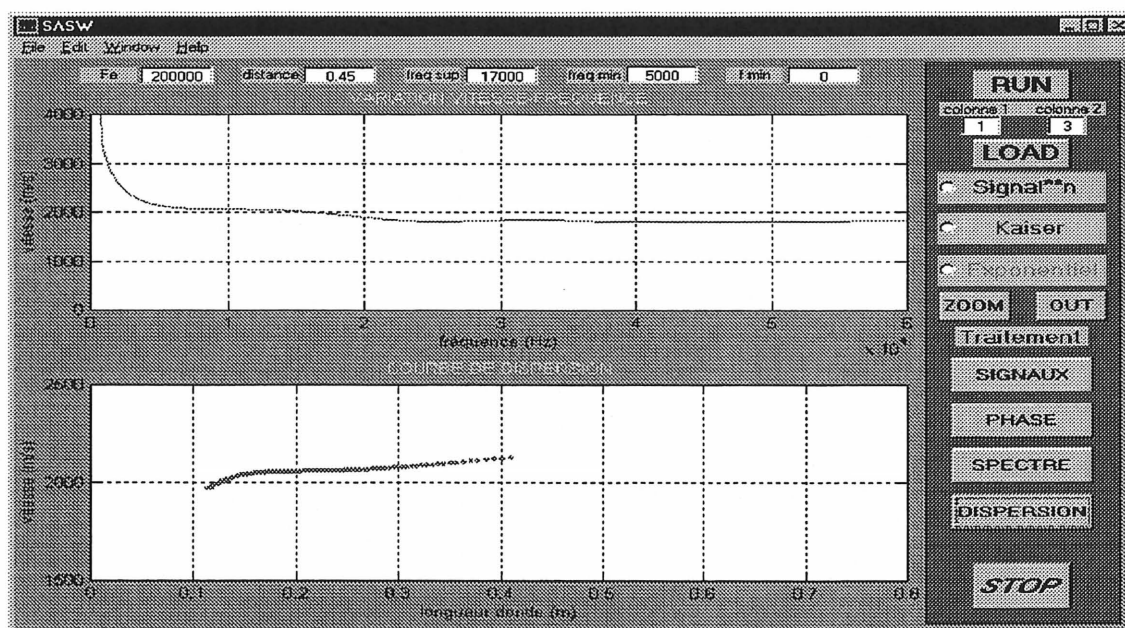


Figure A2-5 Variation de la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh en fonction de la fréquence et courbe de dispersion

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ACI 364.1R.94 : *Guide for the evaluation of concrete structures prior to rehabilitation*

Achenbach, J.D. (1973). *Wave propagation in elastic solids*. North Holland.

Almedia, I.R. (1991). *Non-destructive testing of high strength concrete, rebound and ultrasonic pulse velocity*. Quality control of concrete structures, Proceedings of the international symposium held by RILEM, Ghent, juin 12-14, 37, p 387-398.

Arcone, S. A. (1989). *Analysis of short pulse radar survey of revetements along the Mississippi River*. Tech Report REMR-CS-26, U.S. Army Corps of Engineering, Washington DC.

ASTM Standards :

D 4748 Standard test method for determining the thickness of bound pavement layers using short-pulse radar, 1990 Annual book of ASTM Standards, vol. 04.03

D 4788 Standard test method for detecting delaminations in bridge decks using infrared thermography, 1990 Annual book of ASTM Standards, vol. 04.03.

Ballard, R.F., Jr (1964). *Determination of soil shear moduli at depth by in situ vibratory techniques*. WES, Misc. Paper No. 4-858, November.

Ballivy, G. et Rhazi, J. (1993). *Auscultation et instrumentation des ouvrages en service*. Compte rendu du troisième colloque sur la réfection des infrastructures de béton, Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, Sherbrooke.

Bay, J.A. and Stokoe, K.H., II. (1991). *Field determination of stiffness and integrity of PCC slabs using the SASW method*. Proceedings, Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials, University of Colorado, p. 67-74, October.

Bungey, J.H. (1989). *Testing of concrete in structures*, Chapman and Hall, New York, 228 p.

Cantor, T.R. (1984). *Review of penetrating radar applied to non destructive evaluation of concrete*. In situ non destructive testing of concrete, édité par Malhotra, V.M., ACI SP82, American Concrete Institute, Detroit, MI, p. 581-601.

Carino, N.J. et Sansalone, M. (1991). *Detection of voids in grouted ducts using impact-echo method*. Proceedings of RILEM International workshop on testing during construction, H.W. Reinhardt, Ed., Chapman-Hall, p.369-383.

Clemen, G. (1983). *Non destructive inspection of overlaid bridge decks with ground probing radar*. Transportation Research Record No 899, Washington DC, p. 21-32.

Degebo (1938). *Deutsche gesellschaft fur bodenmechanik*. Vol. 4, Springer, Berlin.

Fouillé, A. (1960). *Physique des vibrations à l'usage des ingénieurs*. 2^{ème} édition, Dunod, Paris.

Ganji, V. Gucunski, N. et Maher, A. (1997). *Detection of underground obstacles by SASW method - numerical aspects*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, March, p. 212-219.

Gucunski N., Ganji, V. et Maher, M.H. (1995). *Effects of obstacles on Rayleigh wave dispersion obtained from the SASW test*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, No. 15, p. 223-231.

Heisey, J.S. (1981). *Determination of in situ shear wave velocity from Spectral-Analysis-of-Surface-waves*. Master's thesis university of Texas, Department of civil engineering, Austin, Texas.

Heisey, J.S., Stokoe, K.H., II, and Meyer, A.H. (1982). *Moduli of pavement systems from spectral analysis of surface waves*. Transportation Research Record, No. 852 : p. 22-31.

Hévin, G., Abraham, O., Pedresen, H.A. et Campillo, M. (1998). *Characterization of surface cracks with Rayleigh waves: a numerical model*. NDT&E International, vol. 31, No. 4: p. 289-297.

Hiltunen, D.R. et Woods, R.D. (1990). *Variables affecting the testing of pavements by the surface wave method*. Transportation Research Record, No. 1260: p. 42-52.

Holf, F.B. et Minning, D.G. (1978). *Infrared thermography for the detection of delamination in concrete bridge decks*. 4th Biennial infrared information exchange, p. A61-A71.

Holf, F.B. et Eales, J.W. (1987). *Non destructive evaluation of pavements*. Concrete International, juin, p. 41-45.

Al-Hunaidi, M.O. (1993). *Insights on the SASW nondestructive testing method*. Canadian Journal of Civil Engineering, vol 20, No. 6 : p. 940-950.

Al-Hunaidi, M.O. (1992). *Difficulties with phase spectrum unwrapping in spectral analysis of surface waves nondestructive testing of pavements*. Canadian Geotechnical Journal, vol 29: 506-511.

Jones, R. (1958). *In situ measurement of the dynamic properties of soil by vibration methods*. Geotechnique, vol. 8, No. 1 : 1-21.

Kalinski, M.E (1994). *Measurements of intact and cracked concrete structural elements by the SASW method*. M.Sc dissertation, civil engineering departement, University of Texas, à Austin, Texas.

Kalinski, M.E., Stokoe, K.H, II, Jirsa, J.O and Roesset, J.M. (1992). *Nondestructive identification of intrnally damaged areas of concrete beam using the spectral analysis of surface waves method*. Transportation Research Record 1458: p. 14-19.

Kharrat, Y. (1997). *Auscultation des structures en béton par tomographie sonique de vitesse et d'atténuation*. Thèse de doctorat en génie civil, Université de Sherbrooke, département de génie civil.

Krstulovic-Opara, N., Woods, R.D. and Al-Shaeya, N. (1996). *Nondestructive testing of concrete structures using the Rayleigh wave dispersion method*. ACI Materials Journal, vol. 93, No. 1, January-February, 1996.

Laboratoire Shermont INC (1984). *Aménagement Chutes Hemming : investigation du béton*. Sherbrooke.

Lecerf, A. (1986). *Physique des ondes et des vibrations*. TEC&DOC, Paris.

Lin, Y. et Sansalone, M. (1992). *Detecting flaws in concrete beams and columns using the impact echo method*. ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 4, juillet-août 1992, pp. 394-405.

Malhotra, V.M. (1976). *Testing Hardened Concrete: Nondestructive methods*, ACI Monograph No. 9, ACI/Iowa State University Press, 204 p.

Malhotra V.M. et Carino, N.J., Eds. (1991). *Handbook on nondestructive testing of concrete*. CRC Press Inc., Boca Raton, FL, 1991, 343 p.

Mast, J.E., Lee, H., Chew, C. et Murphy, J. (1990). *Pulse-echo holographic techniques for microwaves subsurface NDE*. Conference on Non Destructive Evaluation of Civil Structures and Materials, 15-17 octobre, Boulder, Co, National Science Foundation, p.177-191.

Maxwell, A.A. et Fry, F.B. (1967). *A procedure for determining elastic moduli of in situ soils by dynamics techniques*. Proceedings, international symposium on wave propagation and dynamic properties of earth materials, Albuquerque, New Mexico, p. 913-920.

Miller, G.F. and Pursey, H. (1955). *On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid*. Proceedings of the Royal Society, A, 223 : 55-69.

Moore, W.M., Swift, G. et Milberger, L.J. (1973). *An instrument for detecting delamination of concrete bridge decks*. Highway Res. Rec., p.451-495.

Nazarian, S. (1984). *In situ determination of elastic moduli of soils deposits and pavement systems by spectral analysis surface waves method*. Ph.D. thesis, civil engineering department, university of Texas at Austin.

Nazarian, S. and Stokoe, K.H., II (1983). *Use of spectral analysis of surface waves for determination of moduli and thickness of pavement systems*. Transportation Research Record, No. 954.

Pecker, A. (1984). *Dynamique des sols*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 259 pp, Paris.

Olson, L.D., Wright, C. et Stokoe, K.H. (1990). *Strides in non destructive testing*. Civil Engineering ASME, mai, p. 52-55.

Ranson, R.C. et Kung, J.T. (1986). *Non destructive detection of voids beneath pavement*. Public Works, janvier, p. 52-55.

Rayleigh, D.C.L (1885). *On waves propagated along the plane surface of an elastic solid*. Proceedings of the London Mathematical Society, vol. 17: 4-11, November, 1885.

Roget, J. (1988). *Essais non destructifs. L'émission acoustique*. AFNOR-CETIM.

Sanchez-Salinerio, I. (1987). *Analytical investigation of seismic method used for engineering application*. Ph.D. Dissertation, University of Texas, Department of civil engineering, Austin, Texas.

Sansalone, M. et Carino, N.J. (1986). *Impact echo : a method for flaw detection in concrete using transient stress waves*. NBSIR 86-3452, National Bureau of Standards, 222 p. (NTIS PB # 87-104444/AS).

Sansalone, M. et Carino, N.J. (1988). *Impact-echo method: detecting honeycombing, the depth of surface-opening cracks, and ungrouted ducts*. Concrete international, vol. 10, No. 4, avril, pp.38-46.

Sheu, J.C (1987). *Applications and limitations of the spectral analysis of surface waves method*. Ph.D thesis, civil engineering department, university of Texas, Austin, Texas.

Tanicone, P. (1991). *Inspection goes high tech*. Civil Engineering ASME, mai, p38-41.

Teodoru, G.V.M. et Mommens, A. (1991). *Non destrutive testing in the quality control of buildings: Why, what and how?* Quality control of concrete structure. Proceedings of the international symposium held by RILEM, Ghent, june 12-14, pp367-376.

Woods, R. D. (1968). *Screening of surface waves in soils*. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 94, No. 4, July : 951-979.